

УДК 622.271.3.8

**ДИАГНОСТИКА ПОСЛЕАВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ  
ГОРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ  
МЕЖОТРАСЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**С. Вуйич, С. Максимович, М. Радосавлевич, П. Стъепанович**

*Горный исследовательский институт,  
E-mail: slobodan.vujic@rbeograd.ac.rs, Батайнички пут, 2, г. Белград, Сербия*

В середине мая 2014 г. экстремальное количество осадков вызвало водную катастрофу, которая нанесла большой материальный ущерб Колубарскому горнорудному бассейну в Сербии. При изучении ее последствий и диагностики состояния производственной системы использовался межотраслевой анализ. Представлен краткий обзор последствий водной стихии и структуры горно-энергетической системы, обсуждены вопросы реализации межотраслевого моделирования. Сделан вывод об эффективности и надежности применения межотраслевого моделирования при решении практических задач.

*Межотраслевое моделирование, достоверность, диагностика, горно-энергетическая система, аварийная ситуация*

DOI: 10.15372/FTPRPI20220406

---

Проникновение большой массы холодного воздуха через Альпы в район Средиземноморья сформировало глубокий циклон, который в середине мая 2014 г. медленно перемещался по Балканскому полуострову. Водная стихия нанесла огромный материальный ущерб Колубарскому горнорудному бассейну — крупнейшему производителю угля для электроэнергетики Сербии. Добыча угля на четырех карьерах была приостановлена, а производство электроэнергии на тепловых электростанциях поставлено под угрозу [1, 2].

Физическая и функциональная топология горно-энергетической системы с девятью производственными секторами (объектами) обусловила два уровня принятия решений и управления мероприятиями по ликвидации последствий водной катастрофы. Основной подход связан с быстрым принятием оперативных решений и эффективным управлением мероприятиями по устранению или смягчению последствий стихии и скорейшему началу добычи угля в карьерах [1, 2].

Разрушения от наводнения наблюдались на всех карьерах, а его последствия — во всех секторах системы (рисунок). В таких условиях для того, чтобы исследование было целесообразным, а решение адекватным и полным, необходим анализ последствий и по отраслям, и в системе как едином технологическом и производственном звене. Помимо сканирования

и декомпозиции системы, для успешного анализа, выводов и принятия управленческих решений необходим выбор и использование адекватной математической модели. В рассматриваемом случае это типичная межотраслевая проблема, а определение инструментов для принятия решений приводит к моделям “затраты – выпуск” или межотраслевым моделям.



Карьер “Тамнава Западное поле” после наводнения в мае 2014 г.

#### ГОРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОЛУБАРСКОГО БАССЕЙНА

Горно-энергетическая система, носящая название Горнорудный бассейн Колубара — Тепловая электростанция Никола Тесла (РБ КОЛУБАРА – ТЕНТ) является крупнейшим производителем электроэнергии в Юго-Восточной Европе. Во время наводнения 2014 г. уголь добывался на четырех карьерах: “Поле Ц”, “Поле Д”, “Тамнава Западное поле” и “Велики Црлени”. Общая добыча угля в 2014 г. составила около 30.5 млн т.

Пятый производственный объект “Колубарская прерада” также относится к Колубарскому горнорудному бассейну. Задачами данного предприятия являются транспортировка, дробление, сортировка, очистка, сушка угля и производство тепловой энергии, в том числе и для сушки угля. Проектная годовая мощность Колубарской сушильной установки — 855 тыс. т угля, мощность установки по производству тепловой энергии — 120 МВт.

Преобразование тепловой энергии угля в электрическую осуществляется в системе четырьмя тепловыми электростанциями: Никола Тесла А, Никола Тесла Б, Колубара и Морава. Мощность 14 энергоблоков на четырех тепловых электростанциях равна 3.288 МВт. Система производит 17.263 ГВт·ч, что составляет более 50 % электроэнергии Сербии.

Наводнение 14.05.2014 г. остановило работу всех четырех карьеров. Добыча угля на карьерах “Поле Ц” и “Поле Д” возобновилась через 15 дней, при этом суточная добыча составила ~ 40 тыс. т. Ситуация оказалась намного сложнее на полностью затопленных карьерах “Тамнава Западное поле” и “Велики Црлени”. На откачку воды ушло гораздо больше времени. На карьере “Велики Црлени” добыча угля началась в начале августа, около 30 тыс. т/сут, а на карьере “Тамнава Западне поле” — в конце декабря 2014 г., около 13.5 тыс. т/сут. Полное удаление воды из карьера “Тамнава Западное поле”, капитальный ремонт и подготовка к эксплуатации машин и оборудования продолжались до конца апреля 2015 г. [2].

Из запланированных 30.5 млн т с большими техническими, технологическими и организационными усилиями к концу 2014 г. добыто лишь около 23.5 млн т угля. Задержки, падение добычи угля на 23.33 % и другие сбои, вызванные чрезвычайной ситуацией, нарушили функционирование системы и всех ее секторов, но не в равной степени.

### МЕЖСЕКТОРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И АНАЛИЗ

Количественная основа межотраслевого моделирования представлена матрицами условий, которые могут быть постоянными или переменными, а допущение о балансе входов и выходов в секторах системы является фундаментальной основой межотраслевых моделей. Таковы главные черты проведенного межотраслевого моделирования, более детальное изложение теоретических вопросов приведено в [3, 4]. Для методологического упрощения приложения процесс межотраслевого анализа алгоритмизирован с использованием шаблонных таблиц “ввода – вывода”.

Межотраслевая матричная модель горно-энергетической системы РБ КОЛУБАРА – ТЕНТ построена на основе структуры объекта с учетом плана добычи угля и электроэнергии в 2014 г. (табл. 1). В системе 9 производственных объектов: четыре карьера (“Поле Ц”, “Поле Д”, “Тамнава Западное поле”, “Велики Црлени”) и “Колубара прерада”, организационно входящие в Колубарский горнорудный бассейн; четыре тепловые электростанции Никола Тесла А и Б, Колубара и Морава, объединенные под общим названием Тепловые электростанции Никола Тесла. Вместо названий объектов далее используются аббревиатуры  $C_1, C_2, \dots, C_9$ .

ТАБЛИЦА 1. Стартовая матрица горно-энергетической системы по плану на 2014 г.

| Сектор   | Ввод, $\times 10^9$ |              |              |              |              |               |               |              |              |               |               |                |
|----------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------------|
|          | $C_1$               | $C_2$        | $C_3$        | $C_4$        | $C_5$        | $C_6$         | $C_7$         | $C_8$        | $C_9$        | $\Sigma$      | ФП            | РА             |
| Выпуск   | $C_1$               |              |              |              | 2.257        |               |               | 2.439        | 0.385        | 5.082         |               | 5.082          |
|          | $C_2$               |              |              |              |              | 12.455        |               |              |              | 12.455        |               | 12.455         |
|          | $C_3$               |              |              |              |              | 3.295         | 17.200        |              |              | 20.495        | 0.299         | 20.794         |
|          | $C_4$               |              |              |              |              | 5.518         | 0.299         |              |              | 5.817         | 0.084         | 5.901          |
|          | $C_5$               |              |              |              |              |               |               | 0.073        |              | 0.073         | 4.816         | 4.888          |
|          | $C_6$               |              | 0.057        |              |              | 2.900         |               |              |              | 2.957         | 29.841        | 32.798         |
|          | $C_7$               |              | 0.300        | 0.027        |              |               | 1.720         |              |              | 2.047         | 29.648        | 31.695         |
|          | $C_8$               | 0.090        | 0.220        |              | 0.110        |               |               | 0.360        |              | 0.780         | 3.602         | 4.382          |
|          | $C_9$               |              |              |              |              |               |               |              | 0.088        | 0.088         | 0.811         | 0.899          |
| $\Sigma$ | <b>0.090</b>        | <b>0.220</b> | <b>0.357</b> | <b>0.027</b> | <b>2.368</b> | <b>24.167</b> | <b>19.219</b> | <b>2.872</b> | <b>0.473</b> | <b>49.793</b> | <b>69.100</b> | <b>118.894</b> |
| МТ       | 1.339               | 3.289        | 5.499        | 1.560        | 1.300        | 24.917        | 21.000        | 3.122        | 0.500        | 62.526        |               |                |
| АМ       | 0.700               | 2.500        | 3.000        | 0.350        | 0.500        | 4.500         | 3.650         | 0.400        | 0.150        | 15.750        |               |                |
| НЗ       | 0.814               | 1.646        | 1.120        | 0.831        | 1.307        | 0.798         | 0.433         | 0.356        | 0.140        | 7.446         |               |                |
| ВП       | 2.229               | 5.021        | 11.175       | 3.159        | 1.781        | 2.582         | 6.612         | 0.504        | 0.109        | 33.171        |               |                |
| ДП       | 3.743               | 9.166        | 15.295       | 4.341        | 3.588        | 7.880         | 10.695        | 1.260        | 0.399        | 56.367        |               |                |
| РС       | 5.082               | 12.455       | 20.794       | 5.901        | 4.888        | 32.798        | 31.695        | 4.382        | 0.899        | 118.894       |               |                |

Примечание. МТ — материальные затраты (сербский динар); АМ — амортизация; НЗ — чистая прибыль; ВП — прибавочная продукция; ДП — общественный продукт; РС — наличные средства; ФП — конечное потребление; РА — распределенные средства

Межотраслевая математическая модель горно-энергетической системы РБ КОЛУБАРА – ТЕНТ для ее анализа после катастрофического паводка создана путем формирования базовой матрицы с учетом плановых параметров на 2014 г. (табл. 1) и путем расчета матрицы технических коэффициентов (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Матрица технических коэффициентов

| Сектор         | Ввод           |                |                |                |                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> |
| Выпуск         |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| C <sub>1</sub> |                |                |                |                | 0.46190        |                |                | 0.55663        | 0.42812        |
| C <sub>2</sub> |                |                |                |                |                | 0.37976        |                |                |                |
| C <sub>3</sub> |                |                |                |                |                | 0.10045        | 0.54269        |                |                |
| C <sub>4</sub> |                |                |                |                |                | 0.16823        | 0.00944        |                |                |
| C <sub>5</sub> |                |                |                |                |                |                |                | 0.01657        |                |
| C <sub>6</sub> |                |                | 0.00274        |                |                | 0.08842        |                |                |                |
| C <sub>7</sub> |                |                | 0.01443        | 0.00457        |                |                | 0.05425        |                |                |
| C <sub>8</sub> | 0.01771        | 0.01766        |                |                | 0.02250        |                |                | 0.08215        |                |
| C <sub>9</sub> |                |                |                |                |                |                |                |                | 0.09810        |
| Σ              | <b>0.01771</b> | <b>0.01766</b> | <b>0.01717</b> | <b>0.00458</b> | <b>0.48440</b> | <b>0.73686</b> | <b>0.60638</b> | <b>0.65535</b> | <b>0.52622</b> |
| МТ             | 0.26349        | 0.26406        | 0.26445        | 0.26438        | 0.26594        | 0.75974        | 0.66258        | 0.71239        | 0.55633        |
| АМ             | 0.13774        | 0.20072        | 0.14427        | 0.05931        | 0.10229        | 0.13720        | 0.11516        | 0.09127        | 0.16690        |
| НЗ             | 0.16022        | 0.13213        | 0.05386        | 0.14090        | 0.26749        | 0.02433        | 0.01366        | 0.08124        | 0.15583        |
| ВП             | 0.43855        | 0.40309        | 0.53742        | 0.53541        | 0.36428        | 0.07873        | 0.20860        | 0.11510        | 0.12094        |
| ДП             | 0.73651        | 0.73594        | 0.73555        | 0.73562        | 0.73406        | 0.24026        | 0.33742        | 0.28761        | 0.44367        |
| РС             | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |

В табл. 3 представлены различия между запланированными и достигнутыми результатами в горно-энергетической системе на основе технических коэффициентов и распределения средств в качестве идентификаторов.

ТАБЛИЦА 3. Разница между запланированными и достигнутыми результатами

| Сектор         | Ввод, ×10 <sup>9</sup> |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|----------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | C <sub>1</sub>         | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | Σ              | ФП             | РА             |
| Выпуск         |                        |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| C <sub>1</sub> |                        |                |                |                | -1.293         |                |                | -0.552         | -0.127         | -1.972         | -0.437         | -2.409         |
| C <sub>2</sub> |                        |                |                |                |                | 3.137          |                |                |                | 3.137          |                | 3.137          |
| C <sub>3</sub> |                        |                |                |                |                | -1.343         | -10.182        |                |                | -11.525        | -0.607         | -12.132        |
| C <sub>4</sub> |                        |                |                |                |                | 1.390          | 0.076          |                |                | 1.466          | 0.120          | 1.586          |
| C <sub>5</sub> |                        |                |                |                |                |                |                | -0.016         |                | -0.016         | -2.784         | -2.800         |
| C <sub>6</sub> |                        |                | -0.033         |                |                | -0.730         |                |                |                | -0.764         | -7.497         | -8.260         |
| C <sub>7</sub> |                        |                | -0.175         | 0.070          |                |                | -0.438         |                |                | -0.606         | -7.463         | -8.069         |
| C <sub>8</sub> | -0.043                 | 0.053          |                |                | -0.063         |                |                | -0.081         |                | -0.134         | -0.857         | -0.991         |
| C <sub>9</sub> |                        |                |                |                |                |                |                |                | -0.029         | -0.029         | -0.267         | -0.296         |
| Σ              | <b>-0.043</b>          | <b>0.053</b>   | <b>-0.209</b>  | <b>0.007</b>   | <b>-1.356</b>  | <b>2.453</b>   | <b>-10.543</b> | <b>-0.650</b>  | <b>-0.016</b>  | <b>-10.443</b> | <b>-19.791</b> | <b>-30.235</b> |
| МТ             | -0.635                 | 0.828          | -3.208         | 0.419          | -0.745         | -6.276         | -5.346         | -0.706         | -0.164         | -15.833        |                |                |
| АМ             | -0.332                 | 0.630          | -1.750         | 0.094          | -0.286         | -1.133         | -0.929         | -0.090         | -0.049         | -3.847         |                |                |
| НЗ             | -0.386                 | 0.414          | -0.653         | 0.223          | -0.749         | -0.201         | -0.110         | -0.080         | -0.046         | -1.588         |                |                |
| ВП             | -1.056                 | 1.264          | -6.520         | 0.849          | -1.020         | -0.650         | -1.683         | -0.114         | -0.036         | -8.966         |                |                |
| ДП             | -1.774                 | 2.309          | -8.924         | 1.167          | -2.055         | -1.985         | -2.723         | -0.285         | -0.131         | -14.402        |                |                |
| РС             | -2.409                 | 3.137          | -12.132        | 1.586          | -2.800         | -8.260         | -8.069         | -0.991         | -0.296         | -30.235        |                |                |

Межотраслевая модель четко локализует материально-технические, технологические и ресурсные последствия катастрофического наводнения 2014 г. в горно-энергетической системе РБ КОЛУБАРА – ТЕНТ. На уровне интегрированной системы они не видны напрямую, например последствия на карьерах трудно идентифицировать с помощью классических аналитических инструментов. Межотраслевой анализ четко выявил последствия: выделенные средства меньше во всех секторах, кроме  $C_2$  и  $C_4$ . Дефицит колеблется от  $0.296 \cdot 10^9$  до  $12.132 \cdot 10^9$  динар по секторам:

$$\Delta C \rightarrow \begin{cases} \Delta C_1 = -2.409 \\ \Delta C_2 = 3.137 \\ \Delta C_3 = -12.132 \\ \Delta C_4 = 1.586 \\ \Delta C_5 = -2.800 \\ \Delta C_6 = -8.260 \\ \Delta C_7 = -8.069 \\ \Delta C_8 = -0.991 \\ \Delta C_9 = -0.296 \end{cases}$$

Общий объем распределенных средств уменьшился на  $30.235 \cdot 10^9$  динар (25.4 %). Конечное потребление ниже на  $19.791 \cdot 10^9$  (28.6 %), а воспроизведение на  $10.443 \cdot 10^9$  динар (19.5 %). Общественный продукт уменьшился на  $14.402 \cdot 10^9$  динар (25.5 %), а общий чистый заработок (прибыль) на  $1.588 \cdot 10^9$  динар (21.3 %). Межотраслевой анализ указывает на сектор  $C_3$  с наибольшим сокращением производства, что существенно влияет на функционирование сектора  $C_6$ . Поскольку сектор  $C_6$  имеет наибольшую производственную утилизацию электроэнергии, то функционирование его на номинальном уровне предполагает перераспределение и перенаправление угля из менее эффективных секторов в  $C_6$ .

## ВЫВОДЫ

Выполнен сравнительный анализ прогнозируемых и реализованных параметров работы горно-энергетической системы РБ КОЛУБАРА – ТЕНТ за 2014–2021 гг. Результаты анализа показали высокий уровень соответствия прогнозу 2014 г. после катастрофического паводка. Продемонстрирована целесообразность межотраслевого моделирования производственных, ресурсных, стоимостных, доходных, материальных и других причинно-следственных связей в реальной системе. Исследования подтвердили, что межотраслевые модели — эффективные и надежные инструменты оценки работы горно-энергетической системы при условии достоверности входных данных модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vujić S. and Vojinović P. Nature's lesson: flooding of open-pit mines of Tamnava in 2014, Bul. Mines, 2017, Vol. CXIV, No. 1–2. — P. 47–58.
2. Вуйич С., Радосавльевич М., Полавдер С. О последствиях затопления угольных карьеров в Сербии // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 87–91.
3. Вуйич С., Максимович С., Радосавльевич М., Крунич Д. Я. Межотраслевое моделирование и горнодобывающая промышленность // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 78–87.
4. Станойевич Р. Межотраслевые модели. — Белград: Экономический институт, 1998. — 243 с.

*Поступила в редакцию 03/VI 2022*

*После доработки 20/VI 2022*

*Принята к публикации 30/VI 2022*