

УДК 005.41: 621.31

МНОГОМЕРНАЯ ЭКОНОМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА ГРЭС (НА ПРИМЕРЕ КАШИРСКОЙ ГРЭС)

© 2016 г. П. И. Оклея

ПАО «Интер РАО», г. Москва

Создается матричная экономико-технологическая модель (ЭТМ) тестирования энергоблока ГРЭС, которая адаптируется на примере функционирования энергоблока Каширской ГРЭС. Экономико-технологическая модель тепловых электростанций (ТЭС) представляет собой совокупность всех экономических и технологических процессов, связанных с преобразованием тепловых ресурсов в электрические. Предлагаемая матричная структура и математическая программа рассчитывает выпуск и отпуск потребителям энергетических ресурсов, а также цены и добавленные стоимости единицы энергетических ресурсов для всех единиц оборудования, входящих в ЭТМ модель. Данные матричного расчета тестируют контрольные значения сводного отчета экономических показателей ТЭС. ЭТМ модель применима для тестирования других ТЭС с энергоблоками, аналогичными энергоблоку Каширской ГРЭС.

Ключевые слова: тепловые электростанции; экономико-технологическая модель; система управления производственными активами.

There is created a matrix of economic and technological model (ETM) of power plant unit testing, which adapts to the example of the functioning of the Kashira power plant. ETM represents the totality of all the economic and technological processes associated with the conversion of heat into electrical resources. The proposed matrix structure and the program calculates a mathematical issues and supply to consumers of energy resources, as well as the prices and the added value of a unit of energy resources for all pieces of equipment belonging to the ETM model that test analysis in a summary report TPP economic indicators. ETM model is applicable for testing of other thermal power plants.

Key words: thermal power plants; economic and technological model; production assets' management system.

В настоящее время основной задачей энергетических компаний является внедрение в производство системы управления производственными активами (СУПА). СУПА воспринимается и управляется, как совокупность взаимосвязанных процессов, что позволяет эффективно достигать последовательные и прогнозируемые результаты [1]. Целью данной работы является разработка экономико-технологической модели (ЭТМ), которую с достаточной точностью можно применять для тестирования системы управления производственными активами (СУПА) и инструментов обеспечения этой системы.

Тестирование системы управления производственными активами позволит энергетическим компаниям проверять достижения своих целей и проверять эффективность функционирования тепловых электростанций (ТЭС) [2, 3, 4].

Уравнения матричной модели «выпуск — затраты — отпуск» и «цена — расходы — добавленная стоимость» ТЭС

Основу матричного анализа пространства управления объектами технологии энергоблока ГРЭС составляют следующие дуальные матричные уравнения «выпуск — затра-

ты — отпуск» и «цена — расходы — добавленная стоимость» [5]:

$$\begin{cases} (1 - A_{ik})y_k = c_i, \\ (1 - \tilde{A}_{ik})p_k = v_i. \end{cases} \quad (1)$$

Первое уравнение системы (1) с матрицей A_{ik} — это уравнение «выпуск — затраты — отпуск» для материальных активов ГРЭС, где y_k — вектор-столбец валового выпуска k -го объекта энергоблока; c_i — вектор-столбец, описывающий отпуск продукции i -го объекта энергоблока. Матрица A_{ik} описывает затраты i -го объекта, использующего продукцию k -го объекта. Второе уравнение системы (1) «цена — расходы — добавленная стоимость» — это уравнение финансовых активов, где p_k — цена, v_i — добавленная стоимость единицы продукции соответствующего объекта, \tilde{A}_{ik} — транспонированная матрица A_{ik} «цена — расходы — добавленная стоимость». В соответствии с определением транспонированной матрицы строки матрицы A_{ik} определяют затраты материальных ресурсов объектов технологии, а столбцы этой матрицы определяют расходы финансовых ресурсов объектов технологии. Таким образом, в первом и втором уравнения системы (1) входят одни и те же коэффициенты матрицы, обычные для материальных активов и переставленные относительно главной диагонали матрицы для финансовых активов. Это существенное положение математической модели, поскольку показывает связь между затратами материальных и расходами финансовых активов, что свидетельствует о дуализме экономики и технологии, поскольку один и тот же массив коэффициентов A_{ik} определяет технологию производства энергоблока и его финансовые расходы [6].

По уравнениям (1) и известным величинам выпуска y_k энергетических ресурсов k -го объекта технологического процесса можно определить отпуск c_k этих объектов, поставляемый в электрические и тепловые сети. Аналогично по известной стоимости единицы продукции p_k на k -м объекте (или по тарифам) можно определить добавленную стоимость v_i и прибыль, получаемую от управления этим объектом в технологическом процессе производства электроэнергии.

Обратная задача решается по следующим уравнениям:

$$\begin{cases} y_k = (1 - A_{ki})^{-1}c_i, \\ p_k = (1 - \tilde{A}_{ki})^{-1}v_i. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (2) решают следующие задачи. По известному объему отпуска потребителям каждый объект энергоблока имеет план выпуска единиц энергоресурсов, а по добавленной стоимости, получаемой на каждом объекте, можно определить цену, которую следует установить, чтобы обеспечить нужный уровень прибыли. Из второго равенства системы уравнений (2) следует, что стоимость единицы продукции p_k k -го объекта равна удельным расходам производства. В них включаются добавленные стоимости v_i i -го энергообъекта, помноженные на коэффициенты матрицы расходов $(1 - \tilde{A}_{ki})^{-1}$ и просуммированные по всем объектам энергоблока.

В результате технологического процесса производства электроэнергии отпуск энергии энергоблока ТЭС производится только на одном или двух объектах, с которых поставляются энергоресурсы в электрические и тепловые сети, тогда на остальных объектах отпуск равен нулю $c_k = 0$.

Размерность экономико-технологической модели тестирования энергоблока ТЭС 300 МВт

Размерность экономико-технологической модели ТЭС определяется структурной схемой энергоблока, включающей группы оборудования, связанные технологическим процессом преобразования тепловой энергии в электрическую.

Если рассмотреть уровень детализации групп оборудования, представленный структурной схемой технологического процесса энергоблока 300 МВт Каширской ГРЭС [7], то можно исходить из 25-мерной матричной модели технологии энергоблока ТЭС 300 МВт.

Ниже приводятся номенклатура группы оборудования 25 объектов с обозначением элементов матрицы.

Двадцать пять объектов энергоблока (табл. 1) включают следующие группы оборудования: В — выдача электроэнергии и распределение на собственные нужды, М — турбогенераторы и их системы, Н — парогенера-

торы и их системы, L — система паро-водяного цикла, N — теплосети и промышленный пар, P — циркуляционное и техническое водоснабжение, G — водоснабжение, водоподготовка и канализация, E — топливоподача и удаление топливных отходов. Оборудование группы Q — вспомогательные пар, вода, реагенты, включены в матрицу, но для них не определены элементы матрицы.

По структурной схеме технологии энергоблока ГРЭС была создана 25-мерная мат-

рица прямых и косвенных затрат объектов структурных групп оборудования энергоблока ГРЭС, которые связаны взаимными затратами производства каждого объекта с другими. Например, первый объект (1) — электрический генератор, получает энергию механического движения от паровой турбины или от части низкого давления (ЧНД) или ЦНД (2), и их взаимная связь определяется элементом матрицы a_{12} . Далее электрический генератор передает свою энергию на транс-

Таблица 1

Элементы a_{ij} матрицы затрат группы оборудования 25 объектов энергоблока ГРЭС по схеме энергоблока КашГРЭС

№	Объект ГРЭС	Элементы матрицы
1	Электрический генератор	a_{12}, a_{16}, a_{17}
2	Часть низкого давления паровой турбины (ЧНД) или ЦНД	$a_{21}, a_{23}, a_{25}, a_{2,14}, a_{2,19}$
3	Часть высокого давления паровой турбины (ЧВД) или ЦВД	$a_{32}, a_{34}, a_{35}, a_{39}, a_{3,13}, a_{3,16}$
4	Котел	$a_{43}, a_{45}, a_{4,10}, a_{4,11}, a_{4,12}, a_{4,25}$
5	Промежуточный пароперегреватель	$a_{52}, a_{54}, a_{53}, a_{5,13}$
6	Трансформатор связи	a_{61}, a_{68}
7	Трансформатор собственных нужд	a_{71}
8	Главное распределительное устройство	a_{86}
9	Потребитель тепловой энергии	$a_{93}, a_{9,18}$
10	Подготовка топлива	$a_{10,4}$
11	Золоуловитель	$a_{11,4}, a_{11,23}, a_{11,12}$
12	Шлакозолоудаление, золоотвал	$a_{12,4}, a_{12,11}$
13	Подогреватель высокого давления ПВД	$a_{13,3}, a_{13,5}, a_{13,15}$
14	Подогреватель низкого давления ПНД	$a_{14,2}, a_{14,18}, a_{14,16}, a_{14,20}$
15	Питательный насос	$a_{15,13}, a_{15,16}$
16	Дозатор	$a_{16,3}, a_{16,15}, a_{16,17}, a_{16,14}, a_{16,18}$
17	Водоподготовительная установка ВПУ	$a_{17,16}, a_{17,19}, a_{17,21}$
18	Насос обратного конденсата	$a_{18,9}, a_{18,16}, a_{18,14}$
19	Конденсатор	$a_{19,2}, a_{19,20}, a_{19,22}, a_{19,17}, a_{19,21}$
20	Конденсатный насос	$a_{20,19}, a_{20,14}$
21	Циркуляционный насос	$a_{21,19}, a_{21,17}, a_{21,22}$
22	Источник водоснабжения	$a_{22,19}, a_{22,21}$
23	Дымосос ДС	$a_{23,11}, a_{23,24}$
24	Дымовая труба	$a_{24,23}$
25	Дутьевой вентилятор	$a_{25,4}$

форматор связи (6) и на трансформатор собственных нужд (7), что определяется элементами матрицы a_{16} и a_{17} .

Второй объект (2) — часть низкого давления паровой турбины — связан элементом a_{21} с генератором, элементом a_{23} — с объектом (3) — часть высокого давления паровой турбины. Кроме того, имеется связь со следующими объектами: (5) — промежуточный

пароперегреватель, (14) — подогреватель низкого давления ПНД и (19) — конденсатор, что определяется элементами матрицы a_{25} , $a_{2,14}$, $a_{2,19}$ соответственно.

Матрица структурной связи объектов технологического процесса ГРЭС приведена в табл. 2. Диагональные элементы матрицы обозначаются буквой s (или f), $s \equiv 1 - b_i$, где b_i — коэффициент собственных потерь i -го

Таблица 2

Матрица $1 - A_{ij}$ структурной связи объектов технологии ГРЭС*

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	s	a				a	a																			
2	a	s	a		a									a					a							
3		a	s		a				a				a			a										
4				s	a					a	a	a														a
5		a	a	a	s								a													
6	a					s		a																		
7	a						s																			
8						a		s																		
9			a						s										a							
10				a						s																
11				a							s	a												a		
12				a							a	s														
13			a		a								s		a											
14		a												s		a		a		a						
15													a		s	a										
16														a	a	s	a	a								
17																a	s		a		a					
18									a					a		a		s								
19		a															a		s	a	a	a				
20														a					a	s						
21																	a		a		s	a				
22																			a		a	s				
23											a													s	a	
24																								a	s	
25				a																						s

* $s \equiv f \equiv 1 - b_i$, $a \equiv -a_{ij}$.

блока номера строки матрицы. Недиагональные элементы обозначаются буквой a , которая стоит на пересечении i -й строки и j -го столбца и соответствует взаимосвязи i -го и j -го объектов в формате $a \equiv -a_{ij}$. В структуре распределения диагональных элементов матрицы закодирована структурная схема энергоблока, по которой можно определить структурную схему объектов технологического процесса ГРЭС.

Уравнения (1) и (2) для технологии энергоблока ГРЭС запишется в виде двух блоков 25-мерных систем уравнений для материальных и финансовых активов.

Уравнения для отпуска энергоресурсов и добавленных стоимостей:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{25} (1 - A_{ik}) y_k = c_i, \\ \sum_{k=1}^{25} (1 - \tilde{A}_{ik}) p_k = v_i. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения для выпуска энергоресурсов и их цены:

$$\begin{cases} y_k = \sum_{i=1}^{25} (1 - A_{ki})^{-1} c_i, \\ p_k = \sum_{i=1}^{25} (1 - \tilde{A}_{ki})^{-1} v_i. \end{cases} \quad (4)$$

В этих уравнениях суммирование производится по всем 25 объектам энергоблока ГРЭС.

Система уравнений, полученная по первой системе уравнений (3), имеет следующий вид (5):

$$\begin{aligned} c_1 &= (1 - b_1) y_1 - a_{12} y_2 - a_{16} y_6 - a_{17} y_7, \\ c_2 &= -a_{21} y_1 + (1 - b_2) y_2 - a_{23} y_3 - \\ &\quad - a_{25} y_5 - a_{2,14} y_{14} - a_{2,19} y_{19}, \\ c_3 &= -a_{32} y_2 - a_{34} y_4 - a_{3,16} y_{16} + (1 - b_3) y_3 - \\ &\quad - a_{35} y_5 - a_{39} y_9 - a_{3,13} y_{13}, \\ c_4 &= -a_{43} y_3 - a_{45} y_5 - a_{4,10} y_{10} - a_{4,11} y_{11} + \\ &\quad + (1 - b_4) y_4 - a_{4,12} y_{12} - a_{4,25} y_{25}, \\ c_5 &= -a_{52} y_2 - a_{53} y_3 - a_{54} y_4 - \\ &\quad - a_{5,13} y_{13} + (1 - b_5) y_5, \\ c_6 &= -a_{61} y_1 - a_{68} y_8 + (1 - b_6) y_6, \end{aligned} \quad (5)$$

$$c_7 = -a_{71} y_1 + (1 - b_7) y_7,$$

$$c_8 = -a_{86} y_6 + (1 - b_8) y_8,$$

$$c_9 = -a_{93} y_3 + (1 - b_9) y_9 - a_{9,18} y_{18},$$

$$c_{10} = -a_{10,4} y_4 + (1 - b_{10}) y_{10},$$

$$c_{11} = -a_{11,23} y_{23} - a_{11,4} y_4 - a_{11,12} y_{12} + \\ + (1 - b_{11}) y_{11},$$

$$c_{12} = -a_{12,4} y_4 - a_{12,11} y_{11} + (1 - b_{12}) y_{12},$$

$$c_{13} = -a_{13,3} y_3 - a_{13,5} y_5 + (1 - b_{13}) y_{13} - \\ - a_{13,15} y_{15},$$

$$c_{14} = -a_{14,2} y_2 - a_{14,16} y_{16} + (1 - b_{14}) y_{14} - \\ - a_{14,18} y_{18} - a_{14,20} y_{20},$$

$$c_{15} = -a_{15,13} y_{13} - a_{15,16} y_{16} + (1 - b_{15}) y_{15},$$

$$c_{16} = -a_{16,14} y_{14} - a_{16,15} y_{15} + (1 - b_{16}) y_{16} - \\ - a_{16,17} y_{17} - a_{16,18} y_{18},$$

$$c_{17} = -a_{17,16} y_{16} - a_{17,19} y_{19} + (1 - b_{17}) y_{17} - \\ - a_{17,21} y_{21},$$

$$c_{18} = -a_{18,9} y_9 - a_{18,14} y_{14} + (1 - b_{18}) y_{18} - \\ - a_{18,16} y_{16},$$

$$c_{19} = -a_{19,22} y_{22} - a_{19,16} y_{16} + (1 - b_{19}) y_{19} - \\ - a_{19,17} y_{17} - a_{19,20} y_{20} - a_{19,21} y_{21},$$

$$c_{20} = -a_{20,14} y_{14} - a_{20,19} y_{19} + (1 - b_{20}) y_{20},$$

$$c_{21} = -a_{21,17} y_{17} - a_{21,19} y_{19} + (1 - b_{21}) y_{21} - \\ - a_{21,22} y_{22},$$

$$c_{22} = -a_{22,19} y_{19} - a_{22,21} y_{21} + (1 - b_{22}) y_{22},$$

$$c_{23} = -a_{23,24} y_{24} - a_{23,11} y_{11} + (1 - b_{23}) y_{23},$$

$$c_{24} = -a_{24,23} y_{23} + (1 - b_{24}) y_{24},$$

$$c_{25} = -a_{25,4} y_4 + (1 - b_{25}) y_{25}.$$

Поскольку отбор энергии происходит только в трансформаторе для собственных нужд (ТСН) (7) и в главном распределительном устройстве (ГРУ) (8), а также в потребителе тепловой энергии (9), то следующие отпуска не равны нулю: $c_7 \neq 0$, $c_8 \neq 0$ и $c_9 \neq 0$. Тогда отпуска или левые части остальных уравнений равны нулю.

В полученной системе уравнений коэффициенты типа b — это коэффициенты собственных потерь, приходящиеся на единицу производства данного объекта. Коэффициенты типа a — это числа, которые характеризуют взаимные поставки энергии или затраты между объектами ГРЭС. Для конкретного технологического процесса энергоблока ГРЭС эти коэффициенты могут быть определены из различных режимов эксплуатации энергоблока. Различные режимы эксплуатации меняют значения выпуска энергии объекта y , по которым из уравнений (5) можно определить все коэффициенты a . Эти коэффициенты не зависят от объемов выпуска электро- и тепловых ресурсов, а определяются технологией энергоблока. Они не зависят от времени и являются постоянными величинами, пока не меняется технология производства. Имеется 25 диагональных и 69 недиагональных коэффициентов элементов мат-

рицы. Некоторые недиагональные элементы матрицы могут равняться нулю или иметь малые величины, которыми можно пренебречь в зависимости от точности расчета технологических режимов объектов ГРЭС.

Аналитические формулы выпуска группы оборудования энергоблока ГРЭС в зависимости от отпуска энергоресурсов

Ниже приводится решение системы 25 уравнений выпусков объектов оборудования, полученной по разработанной программе расчета на основании матрицы ГРЭС (табл. 2) (6), где определитель системы уравнений равен:

$$\Delta = f_6 f_8 f_9 f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} \begin{pmatrix} f_{14} a_{133} a_{17} a_{21} a_{32} a_{713} + \\ + f_3 f_{13} a_{142} a_{17} a_{21} a_{714} - \\ - f_1 f_2 f_3 f_7 f_{13} f_{14} \end{pmatrix}$$

и диагональные элементы равны: $f_i = 1 - b_i$.

$$y_1 = -\frac{f_2 f_{14}}{f_9 \Delta} \left(\begin{aligned} & f_3 f_6 f_8 f_9 f_{13} f_{16} f_{17} f_{21} f_{15} a_{17} c_7 + f_3 f_7 f_9 f_{13} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{16} a_{68} c_8 + \\ & + f_3 f_6 f_8 f_9 f_{13} f_{16} f_{17} f_{21} a_{17} a_{715} c_{15} + f_3 f_6 f_8 f_9 f_{13} a_{17} a_{721} a_{1716} a_{2117} a_{1615} c_{15} + \\ & + f_6 f_8 f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{39} a_{17} a_{133} a_{713} c_9 \end{aligned} \right),$$

$$y_2 = -\frac{a_{21} f_{14}}{f_9 \Delta} \left(\begin{aligned} & f_3 f_6 f_8 f_9 f_{13} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{17} c_7 + f_3 f_7 f_9 f_{13} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{16} a_{68} c_8 + \\ & + f_3 f_6 f_8 f_9 f_{13} f_{16} f_{17} f_{21} a_{17} a_{715} c_{15} + f_3 f_6 f_8 f_9 f_{13} a_{17} a_{721} a_{1716} a_{2117} a_{1615} c_{15} + \\ & + f_6 f_8 f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{39} a_{17} a_{133} a_{713} c_9 \end{aligned} \right), \quad y_2 = \frac{a_{21}}{f_2} y_1,$$

$$y_3 = \frac{f_{13}}{\Delta} \left(\begin{aligned} & -f_6 f_8 f_9 f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{21} a_{32} a_{17} c_7 - f_1 f_2 f_6 f_7 f_8 f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{39} c_9 - \\ & -f_7 f_9 f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{21} a_{32} a_{16} a_{68} c_8 - f_6 f_8 f_9 f_{14} f_{16} f_{17} f_{21} a_{21} a_{32} a_{17} a_{715} c_{15} - \\ & -f_6 f_8 f_9 f_{14} a_{21} a_{32} a_{17} a_{721} a_{1716} a_{2117} a_{1615} c_{15} + f_6 f_8 f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{142} a_{17} a_{21} a_{39} a_{714} c_9 \end{aligned} \right),$$

$$y_4 = \frac{1}{f_4 f_{11} f_{12} \Delta} \left(\begin{aligned} & -f_6 f_8 f_9 f_{11} f_{12} f_{13} f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{21} a_{32} a_{17} c_7 - \\ & -f_1 f_2 f_6 f_7 f_8 f_{11} f_{12} f_{13} f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{43} a_{39} c_9 - \\ & -f_7 f_9 f_{11} f_{12} f_{13} f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{43} a_{21} a_{32} a_{16} a_{68} c_8 - \\ & -f_6 f_8 f_9 f_{11} f_{12} f_{13} f_{14} f_{16} f_{17} f_{21} a_{43} a_{21} a_{32} a_{17} a_{715} c_{15} - \\ & -f_6 f_8 f_9 f_{11} f_{12} f_{13} f_{14} a_{43} a_{21} a_{32} a_{17} a_{721} a_{1716} a_{2117} a_{1615} c_{15} + \\ & + f_6 f_8 f_{11} f_{12} f_{13} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{43} a_{142} a_{17} a_{21} a_{39} a_{714} c_9 + \\ & + f_6 f_8 f_9 f_{12} f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{411} a_{21} a_{32} a_{17} a_{133} a_{713} c_{11} + \\ & + f_3 f_6 f_8 f_9 f_{12} f_{13} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{411} a_{142} a_{17} a_{21} a_{714} c_{11} - \\ & -f_1 f_2 f_3 f_6 f_7 f_8 f_9 f_{12} f_{13} f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{411} c_{11} + \\ & + f_6 f_8 f_9 f_{11} f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{412} a_{21} a_{32} a_{17} a_{133} a_{713} c_{12} + \\ & + f_3 f_6 f_8 f_9 f_{11} f_{13} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{412} a_{17} a_{21} a_{714} c_{12} - \\ & -f_1 f_2 f_3 f_6 f_7 f_8 f_9 f_{11} f_{13} f_{14} f_{15} f_{16} f_{17} f_{21} a_{412} c_{12} \end{aligned} \right), \tag{6}$$

$$y_5 = \frac{a_{53}f_{13}}{\Delta} \left(\begin{aligned} & -f_6f_8f_9f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{21}a_{32}a_{17}c_7 - f_1f_2f_6f_7f_8f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{39}c_9 - \\ & -f_7f_9f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{21}a_{32}a_{16}a_{68}c_8 - f_6f_8f_9f_{14}f_{16}f_{17}f_{21}a_{21}a_{32}a_{17}a_{715}c_{15} - \\ & -f_6f_8f_9f_{14}a_{21}a_{32}a_{17}a_{721}a_{1716}a_{2117}a_{1615}c_{15} + f_6f_8f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{142}a_{17}a_{21}a_{39}a_{714}c_9 \end{aligned} \right) = a_{53}y_3,$$

$$y_6 = \frac{a_{68}}{f_6f_8} c_8,$$

$$y_7 = -\frac{f_6f_8f_9}{\Delta} \left(\begin{aligned} & f_1f_2f_3f_6f_8f_9f_{13}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}c_7 + f_1f_2f_3f_6f_8f_9f_{13}f_{14}f_{16}f_{17}f_{21}a_{715}c_7 + \\ & + f_1f_2f_3f_6f_8f_9f_{13}f_{14}a_{721}a_{1716}a_{2117}a_{1615}c_{15} + f_1f_2f_6f_8f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{39}a_{133}a_{713}c_9 + \\ & + f_9f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{16}a_{68}a_{21}a_{32}a_{133}a_{713}c_8 + f_3f_9f_{13}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{16}a_{68}a_{142}a_{21}a_{714}c_8 \end{aligned} \right),$$

$$y_8 = \frac{1}{f_8} c_8, \quad y_9 = \frac{1}{f_9} c_9,$$

$$y_{10} = \frac{a_{104}}{f_4f_{10}f_{11}f_{12}\Delta} \left(\begin{aligned} & -f_6f_8f_9f_{11}f_{12}f_{13}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{43}a_{21}a_{32}a_{17}c_7 - \\ & -f_1f_2f_6f_7f_8f_{11}f_{12}f_{13}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{43}a_{39}c_9 - \\ & -f_7f_9f_{11}f_{12}f_{13}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{43}a_{21}a_{32}a_{16}a_{68}c_8 - \\ & -f_6f_8f_9f_{11}f_{12}f_{13}f_{14}f_{16}f_{17}f_{21}a_{43}a_{21}a_{32}a_{17}a_{715}c_{15} - \\ & -f_6f_8f_9f_{11}f_{12}f_{13}f_{14}a_{43}a_{21}a_{32}a_{17}a_{721}a_{1716}a_{2117}a_{1615}c_{15} + \\ & + f_6f_8f_{11}f_{12}f_{13}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{43}a_{142}a_{17}a_{21}a_{39}a_{714}c_9 + \\ & + f_6f_8f_9f_{12}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{411}a_{21}a_{32}a_{17}a_{133}a_{713}c_{11} + \\ & + f_3f_6f_8f_9f_{12}f_{13}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{411}a_{142}a_{17}a_{21}a_{714}c_{11} - \\ & -f_1f_2f_3f_6f_7f_8f_9f_{12}f_{13}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{411}c_{11} + \\ & + f_6f_8f_9f_{11}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{412}a_{21}a_{32}a_{17}a_{133}a_{713}c_{12} + \\ & + f_3f_6f_8f_9f_{11}f_{13}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{412}a_{142}a_{17}a_{21}a_{714}c_{12} - \\ & -f_1f_2f_3f_6f_7f_8f_9f_{11}f_{13}f_{14}f_{15}f_{16}f_{17}f_{21}a_{412}c_{12} \end{aligned} \right),$$

$$y_{10} = \frac{a_{10.4}}{f_{10}} y_4, \quad y_{11} = \frac{1}{f_{11}} c_{11}, \quad y_{12} = \frac{1}{f_{12}} c_{12},$$

Аналитическая формула определителя Δ матрицы технологии ТЭС определяется структурой энергоблока, и величина его остается практически постоянной для различных ГРЭС одной и той же технологии.

Формулы (6) постоянны для различных ТЭС с однотипной технологией. С учетом условия отпусков $c_7 \neq 0$, $c_8 \neq 0$, $c_9 \neq 0$ и $c_{15} \neq 0$ уравнение для выпуска электрогенератора (ЭГ) будет таким:

$$y_1 = 1.0621c_7 + 1.0631c_8 + 0.010649c_9 + 0.0027176c_{15}. \tag{7}$$

По этому уравнению можно проследить влияние на выпуск ЭГ других групп оборудования. Выпуск ЭГ зависит от величины от-

пуска трансформатора собственных нужд (7) c_7 с коэффициентом 1.0621, отпуска главного распределительного устройства (8) c_8 с коэффициентом 1.0631, отпуска тепловых ресурсов (9) c_9 с коэффициентом 0.010649 и отпуска питательного насоса (15) c_{15} с коэффициентом 0.0027176.

Выработка электроэнергетических ресурсов по сводному отчету экономических показателей Каширской ГРЭС за 2012–2014 гг. показана во второй колонке табл. 3. Результаты матричного расчета выпуска электрогенератора y_1 , отпуска с трансформатора связи y_6 приведены в 3 и 4 колонках табл. 3. В последней колонке приведены потери электроэнергии всей группы оборудования В электрогенератора.

Таблица 3

**Экономические показатели Каширской ГРЭС по сводному отчету
и полученные матричным расчетом**

Год	Выработка ЭЭ (млн. кВтч)	Генератор (y_1)	Отпуск трансформатора связи (y_6)	Потери группы В
2012	7432	7930	7432	498
2013	6406	6849	6406	442
2014	4651	4829	4651	178

Уравнение для цены единицы ЭЭ ресурса, выпущенного электрогенератором следующее:

$$p_1 = 1.0514\nu_1 + 351.58\nu_2 + 351.26\nu_3 + 351.61\nu_4 + 3.5168\nu_5 + 0.040926\nu_7 + 351.72\nu_{10} + 3.5126\nu_{13} + 8.438\nu_{14} + 7.0346\nu_{25}. \quad (8)$$

Цена ЭЭ ресурсов, рассчитанная по матричному методу по добавленными стоимостями десяти объектов с номерами $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \nu_5, \nu_7, \nu_{10}, \nu_{13}, \nu_{14}, \nu_{25}$, составляет $p_1 = 1,227647$ (руб). По данным из сводного отчета КашГРЭС тариф ЭЭ ресурсов равен $p_1 = 1,212251612$ (руб).

Аналитические экономические и технологические зависимости экономических и энергетических показателей ТЭС

Аналитические зависимости параметров энергоблока ГРЭС можно проследить на примере технологического процесса Каширской ГРЭС.

На рис. 1 представлена диаграмма выработки электроэнергетических ресурсов [7], выпуска с главного распределительного устройства (ГРУ) (y_6) и выпуска генератора (y_1). Выпуск с ГРУ практически совпадает с плановыми цифрами выпуска. Выпуск генератора (y_1) превышает выпуск ЭЭ ресурсов вследствие наличия потерь в группе оборудования В: «выдача электроэнергии и распределение на собственные нужды», которые даны

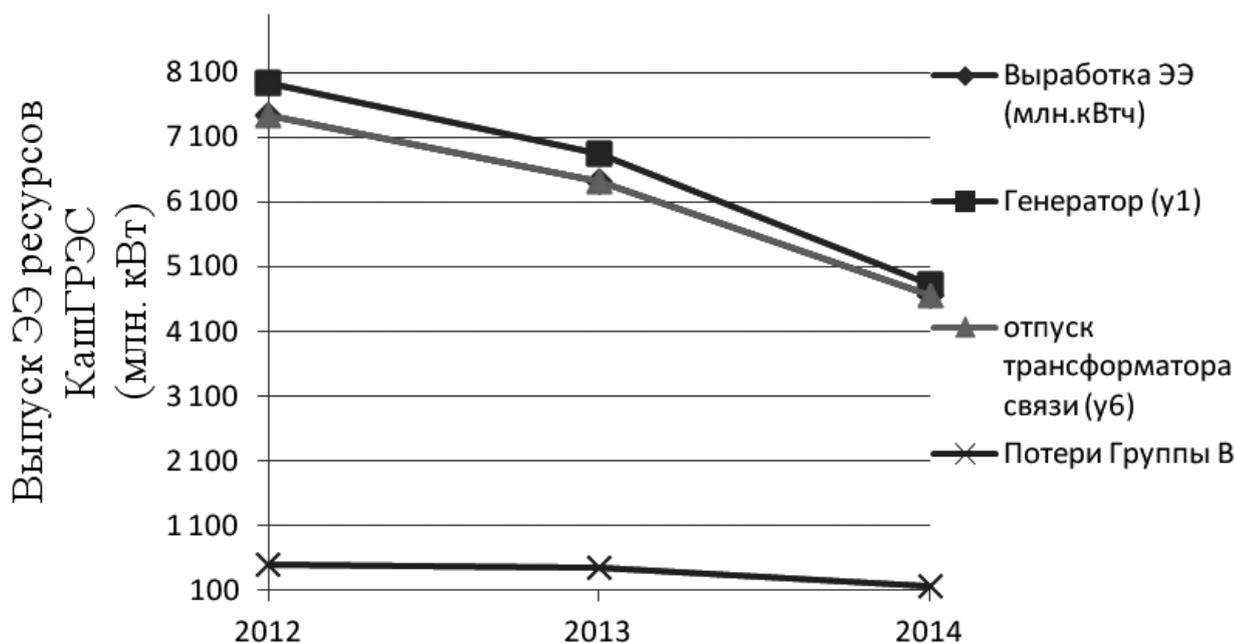


Рис. 1. Диаграмма выработки электроэнергетических ресурсов, выпуска с главного распределительного устройства (y_6) и выпуска генератора (y_1)

в 5 столбце табл. 3: 498, 442, 178 млн. кВтч. (нижний график (рис. 1)).

Заключение

Разработанную экономико-технологическую модель с достаточной точностью можно применять для тестирования системы управления производственными активами (СУПА) и в качестве инструментов обеспечения этой системы. Матрица $1 - A_{ij}$ (табл. 2) структурной связи объектов технологии ГРЭС построена на базе удельных коэффициентов затрат и не зависит от величины выпуска энергоресурсов, поэтому ее можно применять для любых ТЭС с любыми объемами выпуска энергетических ресурсов. Тестирование СУПА позволит энергетическим компаниям проверять достижения своих целей и экономическую эффективность функционирования ТЭС.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. — М.: Стандартинформ, 2015. — 48 с.

2. ГОСТ Р 55.0.01–2014/ИСО 55000:2014. Управление активами. Национальная система стандартов. Общее представление, принципы и терминология. — М.: Стандартинформ, 2015. — 17 с.

3. ГОСТ Р 55.0.02–2014/ИСО 55001:2014. Управление активами. Национальная система стандартов. Системы менеджмента. Требования. — М.: Стандартинформ, 2015. — 11 с.

4. ГОСТ Р 55.0.03–2014/ИСО 55002:2014. Управление активами. Национальная система стандартов. Системы менеджмента. Руководство по применению ISO 55001. — М.: Стандартинформ, 2015. — 27 с.

5. Кустов Е. Ф. Энергия экономики. Методы расчета энергоэффективности и энергосбережения Lamberts, 2012. — 355 с.

6. Оклей П. И. Экономико-математические методы и модели поддержки принятия решений при эксплуатации тепловых электростанций. — М.: КРАСАНД, 2015. — 159 с.

7. Сводный отчет ПАО «Интер РАО» за 2014 (официальный сайт Каширской ГРЭС: <http://irao-generation.com>).

Поступила в редакцию

9 февраля 2016 г.



Оклей Павел Иванович — кандидат экономических наук, руководитель блока производственной деятельности ПАО «Интер РАО».

Okley Pavel Ivanovich — Candidate of economic Sciences, head of the operations unit of PJSC «Inter RAO».

119435, г. Москва, ул. Большая Пироговская, 27, стр. 2
27 Bolshaya Pirogovskaya st., bld., 2119435, Moscow, Russia
Тел.: +7 (495) 664-88-40, факс: +7 (495) 664-88-41
E-mail: Opi1970@yandex.ru