

УДК 004.8:681.3.06

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МНОГОМЕРНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, СОБИРАЕМОЙ НА ТЭС

С. В. Поршневу,

доктор техн. наук, профессор

И. В. Соломаха,

аспирант

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Предложено для описания связей между технологическими показателями, собираемыми информационной системой тепловой электрической станции, использовать нелинейные математические модели, создаваемые на основе метода группового учета аргументов. Приведены результаты сравнительного анализа качества аппроксимации изучаемых зависимостей при использовании линейных и нелинейных математических моделей, свидетельствующие о целесообразности применения последних для описания связей между технологическими показателями.

Ключевые слова — тепловая электрическая станция, информационная система, технологическая информация, технологический показатель, факторный анализ, метод группового учета аргументов.

Введение

Теория управления, а также практический опыт организации функционирования сложных технических объектов показывают, что с возрастанием масштабов этих объектов существенно возрастают роль и значение информационных систем, основной задачей которых является обеспечение учета и управление функционированием объектов на основе сбора, обработки и представления информации о фактических показателях производственной и финансовой деятельности предприятия. Осуществление оперативного контроля над производственной деятельностью, анализ текущей производственной ситуации, принятие управленческих решений — все эти функции сводятся, в конечном итоге, к работе с информацией. И от того, насколько эта информация своевременна, достоверна и полна, зависит конечный успех деятельности всего предприятия. Таким образом, информация превратилась сегодня в ключевой ресурс повышения эффективности деятельности предприятия.

Вышесказанное в полной мере относится и к предприятиям электроэнергетической отрасли, в частности тепловым электрическим станциям (ТЭС). Например, на Сургутской ГРЭС-1

с 2003 г. функционирует информационная система, с помощью которой осуществляются сбор, анализ и хранение технологической информации, в том числе значения технологических показателей энергоблоков станции, характеризующих текущий режим работы станции. В то же время проведенный анализ показал, что эффективность использования полученной информации, в том числе ее роль в принятии управленческих решений руководством ТЭС, недостаточна. Следует отметить, что данная ситуация характерна не только для Сургутской ГРЭС-1, но и для предприятий других отраслей промышленности, например газотранспортной [1]. В этой связи разработка методов анализа технологической информации представляется весьма актуальной.

Многомерные математические модели

Одним из возможных направлений исследований является разработка математических моделей блоков ТЭС, позволяющих описывать связь между показателями. Подобные математические модели дают возможность прогнозировать значения выбранного (зависимого) показателя при изменении значений одного или нескольких независимых показателей. Например, наличие мате-

матической модели, описывающей связь между выработкой электроэнергии блоком (зависимая переменная), отпуском тепла внешнему потребителю и температурой холодного воздуха на входе дутьевого вентилятора (независимые переменные), позволяет определить ожидаемое значение выработки электроэнергии блоком в условиях заданного отпуска тепла внешнему потребителю при прогнозируемом резком понижении температуры окружающей среды. Это, в свою очередь, дает возможность сформировать реальный план выработки и отпуска электроэнергии потребителю, в котором учтены изменения климатических

условий, что представляется весьма актуальным в современных условиях балансирующего рынка электроэнергии.

В рамках выбранного направления исследований авторами проведен анализ технико-экономических показателей (ТЭП), собираемых и рассчитываемых в информационном комплексе Сургутской ГРЭС-1 [2]. На основе результатов анализа для последующего построения математических моделей, описывающих связи между ТЭП, выделена группа энергоблоков (станционный № 4–7), по которым в период с 2003 по 2006 г. собраны среднемесячные значения 46 ТЭП. При вы-

■ Таблица 1. Состав выделенных факторов

Множество	Показатель	Переменная	Единица измерения
{Фактор 1}	Выработка электроэнергии блоком	$x_{1,1}$	МВт/ч
	Выработка пара котлом	$x_{1,2}$	т
	Выработка тепла котлом	$x_{1,3}$	Гкал
	Выработка тепла котлом (уточненная)	$x_{1,4}$	Гкал
	Расход топлива на котел	$x_{1,5}$	т у. т.*
	Расход топлива на отпуск электроэнергии	$x_{1,6}$	т у. т.
	Расход воды на впрыск в промперегрев	$x_{1,7}$	т
	Расход питательной воды	$x_{1,8}$	т
	Расход электроэнергии на собственные нужды котла	$x_{1,9}$	МВт/ч
	Расчетный расход топлива на выработку электроэнергии	$x_{1,10}$	т
	Расход электроэнергии на собственные нужды турбины	$x_{1,11}$	МВт/ч
	Отпуск электроэнергии	$x_{1,12}$	МВт/ч
	Нормативный расход топлива на выработку электроэнергии	$x_{1,13}$	т у. т.
{Фактор 2}	Отпуск тепла внешнему потребителю	$x_{2,1}$	Гкал
	Расчетный расход топлива на выработку тепла	$x_{2,2}$	г/кВт · ч
	Нормативный расход топлива на выработку тепла	$x_{2,3}$	т у. т.
	Отпуск тепла из второго отбора сверх нужд регенерации	$x_{2,4}$	Гкал
	Невозврат конденсата от потребителя	$x_{2,5}$	т
	Отпуск тепла внешним потребителям с паром второго отбора	$x_{2,6}$	Гкал
	Удельный расход топлива на отпуск тепла	$x_{2,7}$	г/кВт · ч
	Расход электроэнергии на тепловую установку	$x_{2,8}$	МВт/ч
{Фактор 3}	Отпуск тепла внешнему потребителю	$x_{2,9}$	Гкал
	Температура охлажденной воды на входе в конденсатор	$x_{3,1}$	°С
	Номинальный относительный расход тепла на собственные нужды котла	$x_{3,2}$	%
	Температура холодного воздуха на входе дутьевого вентилятора	$x_{3,3}$	°С
	Температура уходящих газов после дымососа	$x_{3,4}$	°С
{Фактор 4}	Температура воздуха перед регенеративным воздухоподогревателем	$x_{3,5}$	°С
	Содержание кислорода в уходящих газах	$x_{4,1}$	%
	Давление пара холодного промперегрева	$x_{4,2}$	кгс/см ²
	Давление пара горячего промперегрева	$x_{4,3}$	кгс/см ²
	Температура питательной воды фактическая за подогревателями высокого давления	$x_{4,4}$	°С

* т у. т. — тонна условного топлива.

боре последних использовался критерий информативности, предложенный в работе [3].

Если принять, что число информативных признаков соответствует числу выделенных показателей, то обработка данных, включая задачи классификации, создания новой структуры признакового пространства и интерпретации, представляет определенные трудности. Как известно [4, 5], решение данных задач значительно упрощается, если подвергнуть размерность признакового пространства редукции. Такое сжатие в большинстве случаев оказывается возможным, поскольку на практике некоторые признаки оказываются коррелированными между собой и, следовательно, избыточны с точки зрения содержащейся в них информации. Сжатие сводится к преобразованию исходного 46-мерного пространства данных X в другое пространство Y , в котором можно выбрать подмножество латентных переменных меньшей размерности без существенной потери информации. Для уменьшения размерности задачи мы использовали метод главных компонент (ГК) [4, 5], состоящий в вычислении собственных значений корреляционной матрицы технологических параметров. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что из 46 ТЭП наиболее значимыми оказываются всего 22 показателя, сгруппированные в 4 фактора (множества) (табл. 1).

Анализ результатов факторного исследования

Проведем анализ полученных результатов с технологической точки зрения. Из табл. 1 видно, что множество {Фактор 1} содержит показатели, определяемые выработкой электроэнергии энергоблоком. Учитывая, что анализируются ТЭП конденсационных энергоблоков, вырабатывающих в основном электроэнергию, можно объединить в один фактор следующий ряд показателей, имеющих с выработкой электроэнергии тесную функциональную связь: выработка пара и тепла котлом; расход топлива на котел и на отпуск электроэнергии; расход питательной воды и отпуск электроэнергии. Выработка пара котлом пропорциональна количеству вырабатываемой электроэнергии, а выработка тепла котлом при неизменных параметрах пара перед турбиной пропорциональна выработке пара. Расход топлива на котел связан с расходом тепла через КПД котельного агрегата, который (КПД) изменяется незначительно. Расход топлива на отпуск электроэнергии для конденсационных энергоблоков, у которых отпуск тепла мал, очень близок к расходу топлива на котел. Следовательно, расход питательной воды должен совпадать с расходом пара с учетом технологических пароводяных потерь,

составляющих для конкретных энергоблоков менее 1 % от расхода питательной воды.

Отпуск электроэнергии отличается от выработки электроэнергии на долю собственных нужд, составляющую для данного случая величину не более 4–5 % от вырабатываемой электроэнергии. Это, по-видимому, и является причиной объединения отпуска и выработки электроэнергии в один фактор.

Расход воды на впрыск в промперегрев практически пропорционален нагрузке энергоблоков, а следовательно, и выработке электроэнергии. Основной показатель множества {Фактора 1} — выработка электроэнергии Θ энергоблоком зависит от электрической нагрузки, мощности N энергоблока:

$$\Theta = \sum_{i=1}^n N_i \tau_i,$$

где N_i — мощность энергоблока в i -м периоде; τ_i — длительность i -го периода; n — количество временных периодов в анализируемом интервале (1 месяц) с постоянной электрической нагрузкой.

Все рассмотренные выше показатели должны иметь существенную корреляционную связь с мощностью энергоблока. Иная ситуация складывается с расходом электроэнергии на собственные нужды турбин и котлов. Эти показатели для анализируемых энергоблоков не зависят от электрической мощности, однако зависят от времени работы энергоблока. Особенность использования энергоблоков Сургутской ГРЭС-1 состоит в том, что значительную часть времени блоки работают в базовой части электрического графика с нагрузкой, близкой к номинальной. Вследствие этого выработка электроэнергии пропорциональна суммарному времени работы энергоблока, а расход электроэнергии на собственные нужды пропорционален выработке. Таким образом, все включенные в {Фактор 1} показатели связаны с определяющим показателем — выработкой электроэнергии блоком — и могут рассматриваться совместно.

Множество {Фактор 2} связано с отпуском тепловой энергии от энергоблока, также оно объединяет показатели, характеризующие отпуск тепла от энергоблока с горячей водой. Ряд конденсационных энергоблоков Сургутской ГРЭС-1 отпускают небольшое количество теплоты с паром производственному предприятию, находящемуся недалеко от ГРЭС. Для множества {Фактора 2} определяющим параметром является отпуск тепла внешнему потребителю. Остальные показатели в данном факторе зависят от определяющего — отпуска тепла внешнему потребителю. Это относится также к удельному расходу топлива на отпуск тепла, который должен умень-

шаться при увеличении количества отпускаемой тепловой энергии. Отпуск тепла производится от бойлеров, а расход электроэнергии на тепловую установку определяется расходом сетевой воды через бойлеры.

Корреляционные связи между показателями, включенными в множество {Фактор 3}, являются менее значимыми, чем аналогичные связи между показателями, составляющими множество {Фактор 1}. Здесь определяющим показателем является температура охлаждающей воды на входе в конденсатор.

Эта температура должна быть близка к температуре воды в водоеме Сургутской ГРЭС-1 и коррелировать с температурой наружного воздуха. В летние месяцы динамика изменения температуры холодного воздуха на всасе дутьевого вентилятора и воздуха перед регенеративным воздухоподогревателем (РВП) должна быть аналогична динамике изменения температуры охлаждающей воды на входе в конденсатор. В зимние месяцы эта связь может нарушаться. По технологическим требованиям температура воздуха перед РВП должна быть не менее (или близка) 30 °С. Для этого в зимние месяцы реализуется рециркуляция горячего воздуха перед РВП. Температура холодного воздуха в зимние месяцы зависит от положения шиберов на линии холодного воздуха, определяющего место забора воздуха на всасе вентилятора — с улицы или из помещения котельного цеха. Температура уходящих газов в значительной мере зависит как от температуры холодного воздуха, так и от паропроизводительности котельного агрегата. Влияние первого показателя, по-видимому, сильнее, что и привело к включению температуры уходящих газов в множество {Фактор 3}. Номинальный относительный расход тепла на собственные нужды котла является расчетной величиной и зависит в первую очередь от температуры наружного воздуха.

В множество {Фактор 4} вошли показатели, характеризующие экологические параметры ТЭС, определяющим является содержание кислорода в уходящих газах.

Многомерные статистические модели ТЭП

Проведенная группировка факторов означает, что в соответствии с базовым подходом, используемым в факторном анализе [4], для описания связей между технологическими показателями, вошедшими в описанные выше множества, следует использовать линейные математические модели вида

$$x_{1,k} = a_0 + a_1x_{2,l} + a_2x_{3,m} + a_3x_{4,n}; \quad (1)$$

$$x_{2,l} = a_0 + a_1x_{1,k} + a_2x_{3,m} + a_3x_{4,n}; \quad (2)$$

$$x_{3,m} = a_0 + a_1x_{1,k} + a_2x_{2,l} + a_4x_{4,n}; \quad (3)$$

$$x_{4,n} = a_0 + a_1x_{1,k} + a_2x_{2,l} + a_3x_{3,m}; \quad (4)$$

где $k = \overline{1, 13}$, $l = \overline{1, 9}$, $m = \overline{1, 5}$, $n = \overline{1, 4}$. Коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 в моделях (1)–(4) находятся в соответствии с методом наименьших квадратов (МНК). Полное число возможных сочетаний переменных (количество математических моделей) составило 9360.

Для примера на рис. 1 представлены:

- зависимость среднемесячных значений выработки электроэнергии блоком ($x_{1,1}$);
- аналогичная зависимость, рассчитанная по следующей математической модели:

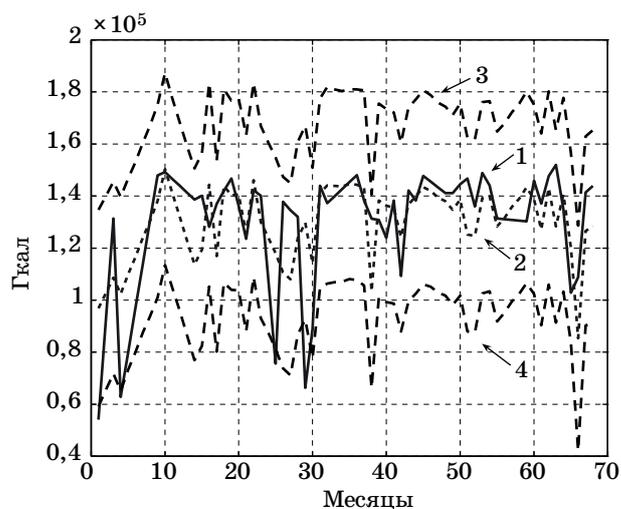
$$x_{1,1} = 2,593 \cdot 10^5 + 3,426 \cdot 10^0 \cdot x_{2,1} + 6,800 \cdot 10^2 \cdot x_{3,1} + (-1,126 \cdot 10^5) \cdot x_{4,1},$$

где $x_{2,1}$ — отпуск тепла внешнему потребителю, $x_{3,1}$ — температура охлаждающей воды на входе в конденсатор, $x_{4,1}$ — содержание кислорода в уходящих газах;

- доверительные интервалы математической модели.

У обсуждаемой математической модели коэффициент детерминации $R = 58 \%$, дисперсия остатков (разностей между исходными значениями и соответствующими значениями) — $1,879 \cdot 10^4$ Гкал.

Для интегральной оценки надежности полученных факторных моделей было проведено исследование рядов остатков всех математических моделей на соответствие нормальному закону распределения. Обобщенные результаты по каж-



■ Рис. 1. Зависимости выработки электроэнергии блоком от номера отчета: кривая 1 — исходная; кривая 2 — рассчитанная по линейной модели; кривые 3 и 4 — соответственно верхняя и нижняя границы доверительных интервалов

■ Таблица 2. Результаты исследования законов распределения рядов остатков

Принадлежность зависимой переменной	Соответствие распределения остатков гипотезе о нормальности распределения остатков	
	Да, шт. (%)	Нет, шт. (%)
{Фактор 1}	1862 (80)	478 (20)
{Фактор 2}	959 (41)	1381 (59)
{Фактор 3}	2218 (95)	122 (5)
{Фактор 4}	2088 (89)	252 (11)
Итого	7127 (76)	2233 (24)

дому из выделенных множеств технологических показателей представлены в табл. 2.

В целом остатки 76 % моделей имеют нормальный закон распределения, что, с нашей точки зрения, является в известной мере подтверждением возможности описания связей между выделенными факторами линейных моделей.

В то же время необходимо отметить, что остатки более половины (59 %) возможных моделей вида (2) имеют закон распределения, отличный от нормального. Это свидетельствует о недостаточности высокого в рассматриваемом случае качества линейных математических моделей. Данные результаты позволяют сделать предположение о возможности получения более качественной аппроксимации зависимостей между выделенными факторами при использовании более сложных математических моделей.

В связи с тем, что на сегодняшний день отсутствуют теоретические обоснования рекомендаций по выбору тех или иных функциональных зависимостей между выделенными факторами, в качестве базового нами выбран метод группового учета аргумента (МГУА), разработанный А. Г. Ивахненко [6] для прогнозирования сложных многофакторных процессов, не имеющих теоретического описания. Основным результатом теории МГУА состоит в том, что при неточных зашумленных данных и коротких выборках минимум критерия указывает нефизическую модель (решающее правило), точность которой выше, а структура — проще структуры полной физической модели.

Напомним, что в МГУА осуществляется последовательное по заданному критерию апробирование моделей-кандидатов, в качестве которых наиболее часто используют полиномиальные опорные функции в виде полинома Колмогорова — Габора:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M a_{ijk} x_i x_j x_k,$$

где M — число переменных; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ — вектор входных переменных; $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_M)$ — вектор коэффициентов слагаемых.

Вектор коэффициентов \mathbf{a} находят по обучающей выборке (набору значений $\bar{x}_n, \bar{y}_n, n = 1, N, N \geq M$) с помощью МНК. На практике оказывается удобным использовать многорядный алгоритм [6], в котором правило итерации остается для всех рядов одним и тем же. Здесь на первом ряду используется частное описание вида

$$y^{(1)} = a_0^{(1)} + a_1^{(1)} x_i + a_2^{(1)} x_j + a_3^{(1)} x_i x_j + a_4^{(1)} x_i^2 + a_5^{(1)} x_j^2;$$

на втором ряду

$$y^{(2)} = a_0^{(2)} + a_1^{(2)} y_i^{(1)} + a_2^{(2)} y_j^{(1)} + a_3^{(2)} y_i^{(1)} y_j^{(1)} + a_4^{(2)} (y_i^{(1)})^2 + a_5^{(2)} (y_j^{(1)})^2;$$

на третьем

$$y^{(3)} = a_0^{(3)} + a_1^{(3)} y_i^{(2)} + a_2^{(3)} y_j^{(2)} + a_3^{(3)} y_i^{(2)} y_j^{(2)} + a_4^{(3)} (y_i^{(2)})^2 + a_5^{(3)} (y_j^{(2)})^2 \quad (5)$$

и т. д.

Выбор данного алгоритма обусловлен тем, что, как видно из (5), здесь используются полиномы, зависящие от двух переменных степени не выше второй. В этой связи при выполнении на каждом ряду моделей процедуры обращения информационной матрицы $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$, где \mathbf{A} — регрессионные матрицы:

$$\mathbf{A}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{2,1} & x_{1,1}x_{2,1} & x_{1,1}^2 & x_{2,1}^2 \\ 1 & x_{1,2} & x_{2,2} & x_{1,2}x_{2,2} & x_{1,2}^2 & x_{2,2}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1,N} & x_{2,N} & x_{1,N}x_{2,N} & x_{1,N}^2 & x_{2,N}^2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & y^{(1)}_{1,1} & y^{(1)}_{2,1} & y^{(1)}_{1,1}y^{(1)}_{2,1} & [y^{(1)}_{1,1}]^2 & [y^{(1)}_{2,1}]^2 \\ 1 & y^{(1)}_{1,2} & y^{(1)}_{2,2} & y^{(1)}_{1,2}y^{(1)}_{2,2} & [y^{(1)}_{1,2}]^2 & [y^{(1)}_{2,2}]^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & y^{(1)}_{1,N} & y^{(1)}_{2,N} & y^{(1)}_{1,N}y^{(1)}_{2,N} & [y^{(1)}_{1,N}]^2 & [y^{(1)}_{2,N}]^2 \end{bmatrix}$$

и т. д.

Опишем подробно методику построения математических моделей МГУА на примере построения зависимости показателя выработки электроэнергии блоком $(x_{1,1})$ от показателей $x_{2,1}, x_{3,1}$ и $x_{4,1}$.

При реализации многорядного алгоритма МГУА:

1. На первом ряду в соответствии с вычислительной процедурой МНК были вычислены коэффициенты следующих полиномов:

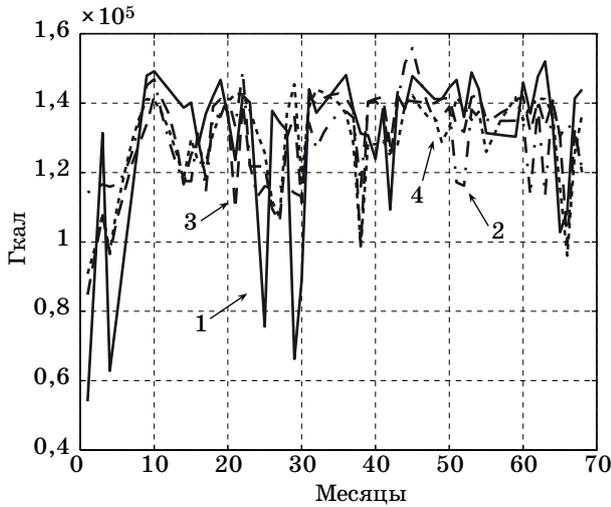


Рис. 2. Зависимость выработки электроэнергии блоком (кривая 1) и полиномов 1-го уровня (2 — $y_1^{(1)}$, 3 — $y_2^{(1)}$, 4 — $y_3^{(1)}$) от номера отсчета

$$y_1^{(1)} = a_{0,1}^{(1)} + a_{1,1}^{(1)}x_{2,1} + a_{2,1}^{(1)}x_{3,1} + a_{3,1}^{(1)}x_{2,1}x_{3,1} + a_{4,1}^{(1)}x_{2,1}^2 + a_{5,1}^{(1)}x_{3,1}^2;$$

$$y_2^{(1)} = a_{0,1}^{(1)} + a_{1,1}^{(1)}x_{2,1} + a_{2,1}^{(1)}x_{4,1} + a_{3,1}^{(1)}x_{2,1}x_{4,1} + a_{4,1}^{(1)}x_{2,1}^2 + a_{5,1}^{(1)}x_{4,1}^2;$$

$$y_3^{(1)} = a_{0,1}^{(1)} + a_{1,1}^{(1)}x_{3,1} + a_{2,1}^{(1)}x_{4,1} + a_{3,1}^{(1)}x_{3,1}x_{4,1} + a_{4,1}^{(1)}x_{3,1}^2 + a_{5,1}^{(1)}x_{4,1}^2.$$

2. В каждой точке ($x_{2,1,k}, x_{3,1,k}, x_{4,1,k}$), $k = \overline{1,68}$ вычислены значения аппроксимирующих полиномов $y_{1,k}^{(1)}, y_{2,k}^{(1)}, y_{3,k}^{(1)}$ (рис. 2).

3. Вычислены дисперсии остатков каждого из полиномов 1-го уровня (табл. 3).

4. Выбраны для построения полиномов 2-го уровня полиномы $y_2^{(1)}, y_3^{(1)}$, имеющие наименьшую дисперсию.

5. На втором ряду в соответствии с вычислительной процедурой МНК вычислены коэффициенты полинома

Таблица 3. Дисперсии остатков полиномов первого уровня

Номер полинома	Дисперсия остатков
$y_1^{(1)}$	$1,922 \cdot 10^4$
$y_2^{(1)}$	$1,705 \cdot 10^4$
$y_3^{(1)}$	$1,806 \cdot 10^4$

$$y_1^{(2)} = a_{0,1}^{(2)} + a_{1,1}^{(2)}y_2^{(1)} + a_{2,1}^{(2)}y_3^{(1)} + a_{3,1}^{(2)}y_2^{(1)}y_3^{(1)} + a_{4,1}^{(2)}[y_2^{(1)}]^2 + a_{5,1}^{(2)}[y_3^{(1)}]^2.$$

6. В каждой точке ($x_{2,1,k}, x_{3,1,k}, x_{4,1,k}$), $k = \overline{1,68}$ вычислены значения аппроксимирующего полинома $y_{1,k}^{(2)}$ (рис. 3).

7. Вычислена дисперсия остатков полинома 2-го уровня, составившая $1,681 \cdot 10^4$ Гкал.

В связи с тем, что дисперсия остатков при переходе от полиномов 1-го уровня к полиному 2-го уровня практически не изменилась, дальнейшее построение полиномов было прекращено. Зависимость исходных данных и значений полинома 2-го уровня от номера отсчета и границы доверительных интервалов представлены на рис. 4. У обсуждаемой математической модели коэффициент детерминации $R = 66\%$, дисперсия остатков модели — $1,681 \cdot 10^4$ Гкал. Таким образом, коэффициент детерминации математической модели, построенной с помощью МГУА, оказался на 10% выше, чем у линейной математической модели, а дисперсия остатков, соответственно, на 12% меньше. Следовательно, нелинейная математическая модель в рассмотренном случае обеспечивает более высокое качество аппроксимации.

Для количественного сравнения качества линейных и нелинейных математических моделей были вычислены дисперсии их остатков (соответственно $D1_j$ и $D2_j$, $j = 1, 2, \dots, 2340$) и проведено их сравнение; с помощью критериев χ^2 и Фишера выполнена проверка на нормальность распределений остатков; вычислены коэффициенты детерминации линейных и нелинейных моде-

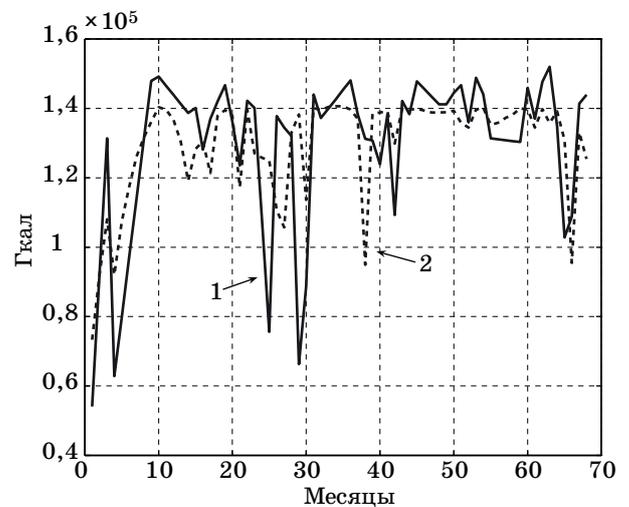
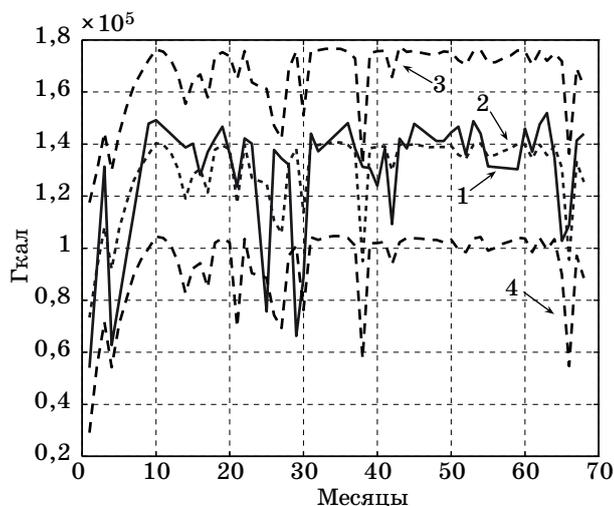


Рис. 3. Зависимость выработки электроэнергии блоком (кривая 1) и полинома 2-го уровня (кривая 2) от номера отсчета



■ Рис. 4. Зависимости выработки электроэнергии блоком (кривая 1) и полинома 2-го уровня (кривая 2) от номера отсчета (кривые 3 и 4 — соответственно верхняя и нижняя границы доверительных интервалов)

лей (R_1 и R_2 ; соответственно) и проведено их сравнение.

Результаты сравнительного анализа свойств остатков линейных (M1) и нелинейных (M2) моделей представлены в табл. 4. Видно, что по качеству нелинейные математические модели, построенные с помощью МГУА, как и в ранее рассмотренном примере, оказываются лучше по сравнению с линейными моделями. В частности, можно отметить следующие их преимущества.

1. У всех нелинейных математических моделей 1-го и 3-го классов дисперсии рядов остатков D оказываются меньше аналогичных величин у линейных математических моделей, а коэффициенты детерминации R , соответственно, больше.

2. Из 2340 нелинейных математических моделей 2-го класса у 2330 моделей (99,53 %) дисперсии рядов остатков D оказываются меньше аналогичных величин для линейных математических моделей, а коэффициенты детерминации R , соответственно, больше.

3. Из 2340 нелинейных математических моделей 4-го класса у 2337 моделей (99,86 %) дисперсии рядов остатков D оказываются меньше ана-

логичных величин для линейных математических моделей, а коэффициенты детерминации R , соответственно, больше.

4. У нелинейных математических моделей в сравнении с линейными оказывается больше количество моделей, остатки которых имеют нормальный закон распределения: на 14, 17, 3 и 9 % для моделей 1-, 2-, 3- и 4-го классов соответственно.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что вопреки устоявшемуся в факторном анализе подходу — использовать для описания связей между факторами линейные математические модели — применение в рассматриваемом случае нелинейных математических моделей, построенных с помощью МГУА, обеспечивает более высокое качество аппроксимации анализируемых данных. Использование линейных и нелинейных математических моделей позволяет технологам задавать произвольные значения факторов и согласно полученной регрессионной модели рассчитывать значение зависимого фактора и его доверительный интервал. Математические модели также позволяют выполнять количественную оценку и оценку поведения ТЭП при значительных изменениях одного или нескольких ТЭП модели, в свою очередь полученные оценки дадут возможность технологам имитировать различные ситуации (в том числе и критические), за счет чего повысится отказоустойчивость системы в целом.

Заключение

Развиваемый в статье подход основан на комплексном использовании факторного анализа, позволяющего уменьшить пространство информационных параметров, описывающих состояние системы, и нелинейных математических моделей, построенных в соответствии с МГУА, которые описывают связь между показателями в пространстве меньшей размерности. Представляется перспективным применение данного метода при обработке информации, собираемой информационными системами сложных технических объектов (например, ТЭС, газоперекачивающих агрегатов и т. п.).

■ Таблица 4. Результаты сравнительного анализа остатков линейных и нелинейных моделей

№ класса математической модели	Принадлежность зависимой переменной	Доля моделей, у которых $D1_j < D2_j$	Нормальный закон распределения, %		Доля моделей, у которых $R1_j > R2_j$
			M1	M2	
1	{Фактор 1}	0	80	94	0
2	{Фактор 2}	10	41	68	10
3	{Фактор 3}	0	95	98	0
4	{Фактор 4}	3	90	99	3

Литература

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Поршнеv С. В. и др. Диагностика газоперекачивающих агрегатов на основе анализа технологической информации. — Екатеринбург: УрО РАН, 2007. — 205 с. 2. Соломаха И. В., Аронсон К. Э., Поршнеv С. В. Опыт анализа технологической информации, собираемой на тепловых электрических станциях // Науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «СВЯЗЬ-ПРОМ 2008» и 5-го Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬПРОМ-ЭКСПО 2008». Екатеринбург: Компания РеалМедиа, 2008. С. 29–32. 3. Соломаха И. В. Анализ технологической информации собираемой АСУТП теплоэлектростанции// | <p>Информатика и управление в технических системах: Одиннадцатая Всерос. студ. науч.-техн. интернет-конф. http://webconf.rtf.ustu.ru (дата обращения: 09.01.08).</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Дубров А. М. Обработка статистических данных методом главных компонент. — М.: Статистика, 1978. — 136 с. 5. Лоул Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод: пер. с англ. Ю. Н. Благовещенского. — М.: Мир, 1967. — 143 с. 6. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. — Киев: Наук. думка, 1982. — 290 с. |
|---|---|

Уважаемые подписчики!

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4200 рублей, включая НДС 18 % и почтовые расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогам:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс;

«Пресса России» — № 42476,

а также посредством:

«Издательский дом «Экономическая газета»

Москва, тел.: (499) 152-88-50, 661-20-30, эл. почта: arpk@akdi.ru, izdatcat@eg-online.ru

«Северо-Западное Агентство «Прессинформ»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335 97 51, 337 23 05, эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

Подписное агентство «МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681 91 37, 681 87 47, эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787 38 73, эл. почта: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>

«Артос-Гал»

Москва, тел.: (495) 603 27 28, 603 27 33, 603 27 34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: krasnodar@interpochta.ru

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

и др.

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

Возможно оформление редакционной подписки, как на текущий год, так и на все вышедшие в свет номера журнала, по заявке организации или частного лица:

по почте: 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ, Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

по телефону: (812) 494-70-02

по e-mail: 80x@mail.ru