

УДК 620.9, 519.654

ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСНОВНЫХ РЕСУРСОВ И ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

В.Е. Зотеев, Л.А. Сагитова, А.А. Гаврилова¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zoteev-ve@mail.ru, l0410@mail.ru, a.a.gavrilova@mail.ru

Аннотация. В связи с тем, что региональные энергосистемы являются сложными динамическими системами, функционирующими в условиях постоянных изменений внешней среды, возникает необходимость выработки сложных управленческих решений и проведения системного анализа эффективности, что невозможно без совершенствования математических моделей динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов, оказывающих наибольшее влияние на выпуск энергии энергосистемой.

В работе проведен анализ существующих методов математического описания динамики основных ресурсов и их недостатков. Рассмотрены ковариационно-стационарные модели временных рядов в форме разностных уравнений с детерминированным полиномиальным трендом. Приведены результаты математического моделирования динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов на основе статистических данных деятельности энергосистемы Самарской области, публикуемых в ежегодной отчетности региональных министерств и энергетических компаний, и проведен их анализ.

На основе сравнительного анализа математических моделей были выбраны наиболее эффективные модели динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов, обладающие наилучшими прогнозными качествами.

Также в работе описана одноконтурная имитационная модель системы управления энергосистемой на основе формирования инвестиций на обновление капитальных ресурсов, а также система поддержки принятия решений (СППР), позволяющая формировать математически обоснованные управленческие решения.

Ключевые слова: энергосистема, энергоэффективность, основные ресурсы, ковариационно-стационарные модели временных рядов, статистический анализ, имитационная модель управления, СППР.



© Автор(ы), 2024

¹ Владимир Евгеньевич Зотеев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и информатики.

Ляйсан Акзамовна Сагитова, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Анна Александровна Гаврилова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Введение

Энергетическая отрасль любого региона является основой развития промышленности и поддержания качества жизни бытовых потребителей. Поэтому возникает необходимость решения задач повышения эффективности, оптимизации и управления энергопроизводствами. Прогнозирование технико-экономических процессов позволяет анализировать сложившиеся закономерности технологических процессов, конструировать сценарии их деятельности, определять направления их развития.

В работах [1–3] были разработаны математические модели суммарного производства тепловой электрической энергии энергосистемой Самарской области, проведены оценки их качества и сравнительный анализ. Поскольку в построенных моделях производство энергии определялось зависимостью от факторов производства – капитальных, трудовых и топливных ресурсов, то для планирования работы энергосистемы и выработки управляющих воздействий, направленных на повышение эффективности ее работы, необходима также достоверная оценка прогнозных значений входных ресурсов. Таким образом, актуальной становится задача построения и статистического анализа математических моделей динамики основных ресурсов на основе статистических данных за период с 1990 по 2021 гг.

Постановка задачи и методы ее решения

В работах [4, 5] для построения прогнозов капитальных, трудовых и топливных ресурсов использовались стандартные методы прогнозирования временных рядов, основанные на экспоненциальном сглаживании (метод Брауна, Хольта и Тригга – Лича).

Суть метода Брауна заключается в том, что прогнозное значение определяется через предыдущее спрогнозированное значение, но скорректированное на величину отклонения факта от прогноза:

$$y_k = \hat{y}_{k-1} + \alpha \cdot (y_{k-1} - \hat{y}_{k-1}).$$

К основным недостаткам адаптивных моделей прогнозирования можно отнести то, что данные модели хорошо воспроизводят гладкие временные ряды и очень плохо воспроизводят выбросы [6, 7]. Преимущественно данные методы используются для краткосрочного прогнозирования.

Также в работах [4, 5] отсутствуют интервальные оценки прогнозов и прогнозные значения имеют достаточно большие отклонения от реальных данных, что можно отнести к недостаткам метода.

Основными задачами исследования при построении математических моделей ресурсов являются первоначальный выбор вида модели, оценка параметров этой модели и статистический анализ результатов вычислений, корректировка моделей динамики основных ресурсов и оценка ее эффективности.

В данной работе для устранения недостатков существующих методов прогнозирования входных ресурсов используются ковариационно-стационарные стохастические модели временных рядов в форме разностных уравнений с детерминированным полиномиальным трендом в виде [8–13]

$$y_k = \sum_{j=1}^p \lambda_j y_{k-j} + \sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)} + \varepsilon_k, \quad (1)$$

где $y_k = \sum_{j=1}^p \lambda_j y_{k-j} + \varepsilon_k$ – стохастическое разностное уравнение в форме модели

авторегрессии порядка p ; $P_m(t_k) = \sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)}$ – детерминированный тренд

в форме многочлена степени m относительно временной переменной t_k ; ε_k – последовательность независимых случайных величин с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями σ_ε^2 : $M[\varepsilon_k] = 0$,

$$\text{cov}[\varepsilon_k, \varepsilon_{k \pm p}] = \begin{cases} 0, & p \neq 0; \\ \sigma_\varepsilon^2, & p = 0. \end{cases}$$

В качестве критерия среднеквадратичного оценивания параметров моделей используется минимизация суммы квадратов остатков

$$\sum_{k=0}^{31} (y_k - \hat{y}_k)^2 = \|y - \hat{y}\|^2 = \|e\|^2 \rightarrow \min \quad [14, 16].$$

Проверка обоснованности выбора такого критерия строится на основе анализа остатков и выявления в них корреляции с использованием статистики Дарбина – Уотсона [14, 15, 17].

Оценка адекватности математической модели состоит из проверки статистической значимости каждого коэффициента регрессионного уравнения на основе t -статистики Стьюдента, а также анализа значений суммы квадратов отклонений $Q_{ост}$ модельных значений от фактических, средних относительных отклонений $s, \%$ модельных значений от фактических, а также значения статистики Дарбина – Уотсона.

Разработка и построение математических моделей динамики капитальных ресурсов

При построении модели динамики капитальных ресурсов $K(t)$ в качестве первоначальной математической модели была выбрана ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения третьего порядка с полиномиальным трендом второго порядка:

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 y_{k-3} + \lambda_4 + \lambda_5 t_k + \lambda_6 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 3, 4, 5, \dots, N-1. \quad (2)$$

Результаты вычислений параметров данной и последующих моделей динамики капитальных ресурсов и их статистического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров математических моделей динамики капитальных ресурсов

Модель		Коэффициенты модели						$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
№	Формула	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6			
1	(2)	0,856	-0,179	-0,008	0,55	0,001	-0,00128	0,175	5,5	2,04
2	(3)	0,722	0,462	-0,0018	-0,0010	–	–	0,192	5,7	1,74
3	(4)	0,664	0,555	-0,0013	–	–	–	0,197	5,8	1,60
4	(5)	0,767	1,631	-0,0031	–	–	–	0,213	6,0	1,82

В последних трех столбцах табл. 1 приведены: $Q_{ocm} = \|y - \hat{y}\|^2$ – сумма квадратов отклонений результатов расчета $\hat{y}_k$ по модели от результатов наблюдений; $s, \% = \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y\|} \cdot 100\%$ – оценка относительного отклонения модели от эксперимента; $DW = 2(1-r)$ – статистика Дарбина – Уотсона, на основе которой можно сделать вывод о наличии автокорреляции в случайном возмущении ε_k , где r – выборочный коэффициент корреляции.

Проверка значимости параметров построенной модели (2) на основе t -статистики Стьюдента показала, что критерий Стьюдента для параметров λ_2 и λ_3 меньше критического значения; следовательно, значения полученных коэффициентов являются незначимыми.

С учетом сделанного вывода была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения первого порядка с полиномиальным трендом второго порядка:

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_4 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots, N-1. \quad (3)$$

Поскольку в модели (3) согласно результатам вычислений незначимым оказался параметр λ_3 , то математическая модель динамики капитальных ресурсов упрощается к виду

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots, N-1. \quad (4)$$

Упрощенная модель (4) динамики капитальных ресурсов является ковариационно-стационарной стохастической моделью временного ряда, построенной на основе полиномиального тренда второго порядка.

Анализ остатков для модели (4) указал на наличие автокорреляции в элементах случайного возмущения ε_k , что снижает эффективность оценок ее коэффициентов. Поэтому была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая модель временного ряда, в которой случайное возмущение η_k описывается авторегрессионной моделью временного ряда первого порядка:

$$\begin{cases} y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k^2 + \eta_k, & k = 0, 1, \dots, N-1; \\ \eta_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\lambda_1^2}}, & \eta_k = \lambda_1 \eta_{k-1} + \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, \dots, N-1, \end{cases}$$

которая может быть приведена к виду:

$$\begin{cases} y_0 = y_0 - \sqrt{1-\lambda_1^2} (y_0 - \lambda_2 - \lambda_3 t_0^2) + \varepsilon_0; \\ y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k^2 + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 - \lambda_3 t_{k-1}^2) + \varepsilon_k, & k = 1, 2, \dots, N-1. \end{cases} \quad (5)$$

Статистический анализ полученных результатов показал, что построенные модели (2)–(5) обладают достаточно хорошими аппроксимативными свойствами и высокой степенью адекватности, а также что повышение порядка авторегрессии при описании модели динамики капитальных ресурсов статистически не оправдано.

Для окончательного выбора математической модели, описывающей динамику капитальных ресурсов, была проведена оценка погрешностей ретроспективных прогнозов динамики капитальных ресурсов по моделям (2)–(5) на основе

статистических данных за 20 лет с прогнозом на 1 год вперед. Усредненные значения относительных погрешностей прогнозов и усредненные радиусы доверительных интервалов в относительных единицах графически отображены на рис. 1 в сравнении с методом Брауна (модель под номером 5) [2, 3].

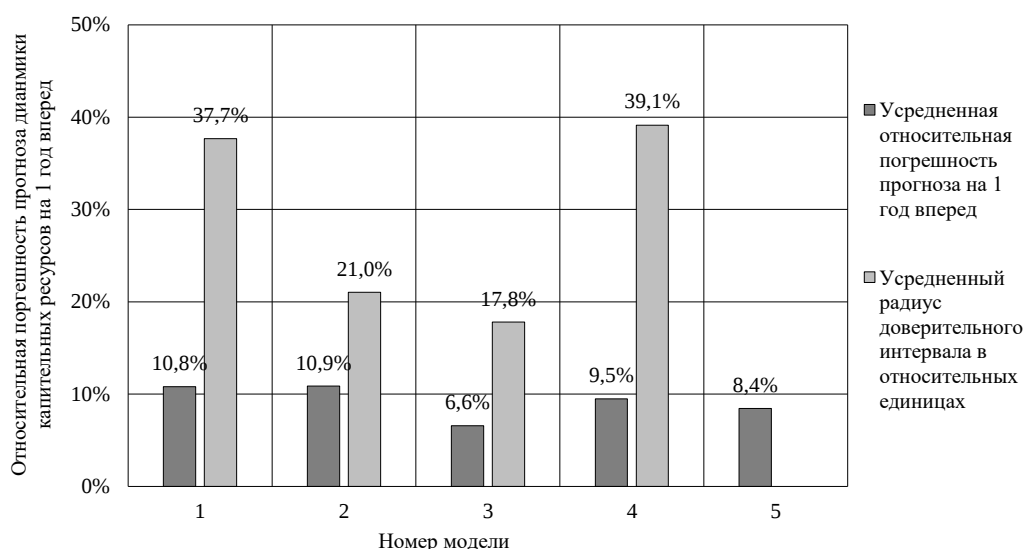


Рис. 1. Сравнительный анализ усредненных значений относительных погрешностей прогнозов и усредненных радиусов доверительных интервалов для моделей (2)–(5)

Также были исследованы прогнозные свойства моделей (2)–(5). Для этого были построены прогнозы на 1, 2, 3, 4 и 5 лет на даты с 2010 по 2021 год по выборкам результатов наблюдений за предыдущие $N = 20$. Усредненные результаты погрешностей прогнозов приведены в табл. 2, в которой под номером 5 представлены результаты расчета методом Брауна.

Таблица 2

**Погрешности прогноза динамики капитальных ресурсов,
сделанного на основе исследуемых математических моделей, %**

Количество лет, на которые сделан прогноз	Номер модели				
	1	2	3	4	5
1	10,8	10,9	6,6	9,5	8,4
2	14,8	14,9	10,6	15,6	14,7
3	17,4	16,7	13,0	19,7	15,5
4	21,1	23,0	15,5	26,6	20,2
5	28,5	32,9	20,4	37,1	33,1

По результатам анализа относительных ошибок прогнозов при использовании различных математических моделей (2)–(5) наилучшей моделью является модель 3, которая обладает наименьшими ошибками прогнозов по сравнению с остальными.

На рис. 2 продемонстрированы усредненные значения погрешностей прогнозов динамики капитальных ресурсов, рассчитанные по модели 3 и методу экспоненциального сглаживания Брауна.

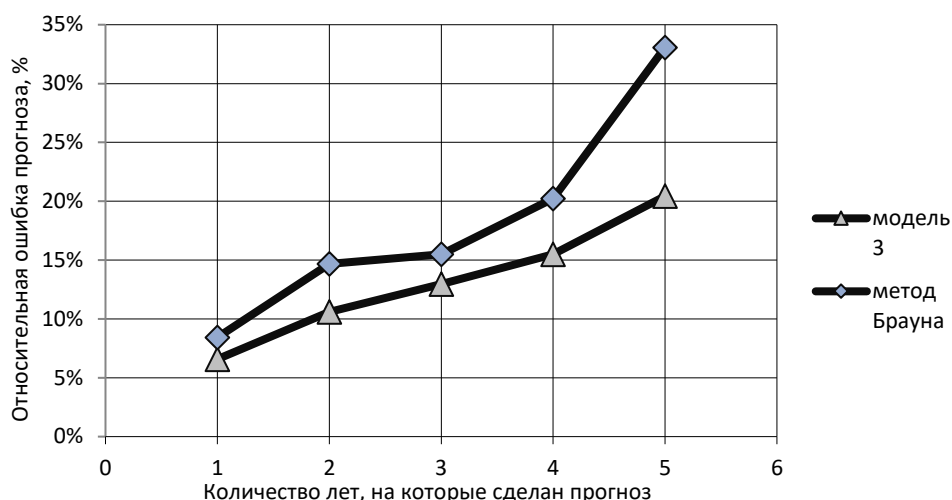


Рис. 2. Значения усредненных погрешностей ретроспективных прогнозов динамики капитальных ресурсов, рассчитанные по модели 3 (формула 4) и методом Брауна

Разработка и построение математических моделей динамики трудовых ресурсов

При построении модели динамики трудовых ресурсов $L(t)$ в качестве первоначальной математической модели была выбрана ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения третьего порядка с полиномиальным трендом второго порядка (2):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 y_{k-3} + \lambda_4 + \lambda_5 t_k + \lambda_6 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 3, 4, 5, \dots, N-1.$$

Результаты вычислений параметров данной и последующих моделей динамики капитальных ресурсов и их статистического анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов параметров математических моделей динамики трудовых ресурсов

Модель		Коэффициенты модели						$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
№	Формула	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6			
1	(2)	0,180	0,344	0,159	0,32	-0,025	0,00138	0,068	6,0	2,39
2	(3)	0,335	0,760	-0,0127	-0,0024	—	—	0,127	7,8	1,72
3	(6)	0,715	0,290	-0,0092	—	—	—	0,150	8,5	2,27
4	(7)	0,784	0,992	-0,0136	—	—	—	0,175	9,0	2,10

Проверка значимости параметров построенной модели (2) показала, что критерии Стьюдента для параметров λ_2 и λ_3 меньше критических значений; следовательно, значения полученных коэффициентов являются незначимыми.

С учетом сделанного вывода была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения первого порядка с полиномиальным трендом второго порядка (3):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_4 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k=1,2,3,4,\dots,N-1.$$

Поскольку в модели (3) согласно результатам исследований незначимым оказался параметр λ_4 , то математическую модель динамики трудовых ресурсов можно упростить к виду

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \varepsilon_k, \quad k=1,2,3,4,\dots,N-1. \quad (6)$$

Также была рассмотрена модель динамики трудовых ресурсов в форме ковариационно-стационарной стохастической модели временного ряда, построенной на основе линейного тренда, в которой случайное возмущение описывается авторегрессионной моделью временного ряда первого порядка

$$\begin{cases} y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \eta_k, & k=0,1,\dots,N-1; \\ \eta_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\lambda_1^2}}, & \eta_k = \lambda_1 \eta_{k-1} + \varepsilon_k, \quad k=1,2,\dots,N-1, \end{cases}$$

или в виде

$$\begin{cases} y_0 = y_0 - \sqrt{1-\lambda_1^2} (y_0 - \lambda_2 - \lambda_3 t_0) + \varepsilon_0; \\ y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 - \lambda_3 t_{k-1}) + \varepsilon_k, & k=1,2,\dots,N-1. \end{cases} \quad (7)$$

Статистический анализ полученных результатов показал, что построенные модели (2), (3), (6) и (7) обладают достаточно хорошими аппроксимативными свойствами и высокой степенью адекватности.

С целью окончательного выбора наилучшей математической модели для описания динамики трудовых ресурсов также была проведена оценка погрешностей ретроспективных прогнозов по данным 20 лет на 1 год вперед. Усредненные значения относительных погрешностей прогнозов и усредненные радиусы доверительных интервалов в относительных единицах графически отображены на рис. 3 в сравнении с методом Брауна [2, 3].

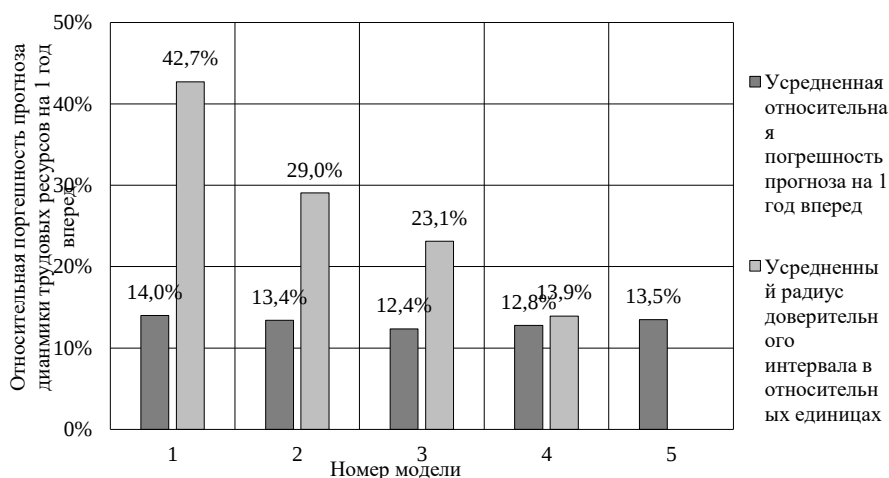


Рис. 3. Сравнительный анализ усредненных значений относительных погрешностей прогнозов и усредненных радиусов доверительных интервалов для моделей (2), (3), (6) и (7)

Также были исследованы прогнозные свойства моделей (2), (3), (6) и (7). Для этого были построены прогнозы на 1, 2, 3, 4 и 5 лет на даты с 2010 по 2021 год по

выборкам результатов наблюдений за предыдущие $N = 20$ лет. Усредненные результаты погрешностей прогнозов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Погрешности прогноза динамики трудовых ресурсов, сделанного на основе исследуемых математических моделей, %

Количество лет, на которые сделан прогноз	Номер модели				
	1	2	3	4	5
1	14,0	13,4	12,4	12,8	13,5
2	30,8	24,5	18,6	19,8	21,4
3	34,6	28,8	19,3	20,3	26,5
4	30,9	31,1	18,5	19,6	27,1
5	31,9	35,2	16,5	21,5	22,8

По результатам анализа относительных ошибок прогнозов при использовании различных математических моделей (2), (3), (6) и (7) наилучшей моделью является модель 3 – формула (6), которая обладает наименьшими ошибками прогнозов по сравнению с остальными.

На рис. 4 продемонстрированы усредненные значения погрешностей прогнозов динамики трудовых ресурсов, рассчитанные по модели 3 и методом экспоненциального сглаживания Брауна [2, 3].

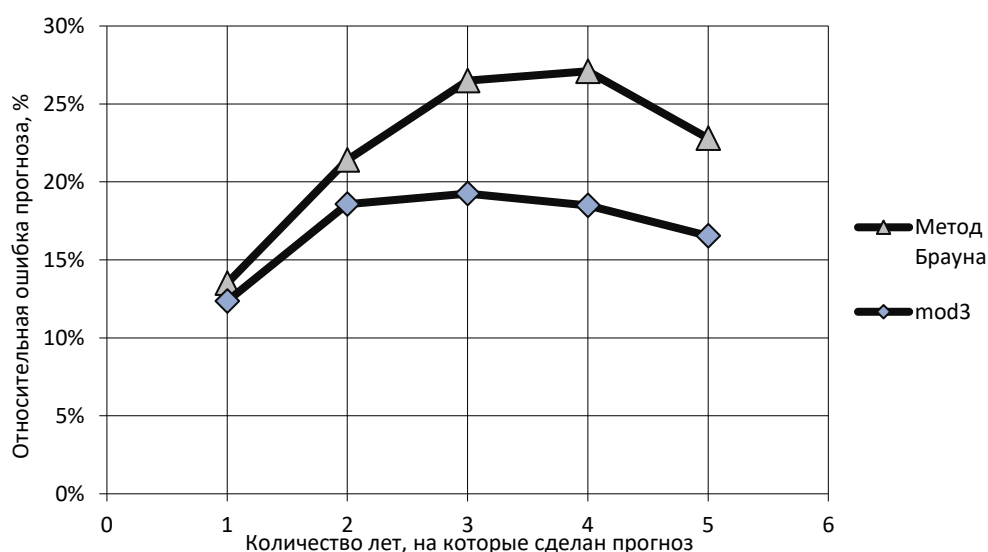


Рис. 4. Значения усредненных погрешностей ретроспективных прогнозов динамики трудовых ресурсов, рассчитанные по модели 3 (формула 6) и методом Брауна

Разработка и построение математических моделей динамики топливных ресурсов

При построении модели динамики топливных ресурсов $B(t)$ в качестве первоначальной математической модели аналогично построению моделей динамики капитальных и трудовых ресурсов была выбрана ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения третьего порядка с полиномиальным трендом второго порядка (2):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 y_{k-3} + \lambda_4 + \lambda_5 t_k + \lambda_6 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 3, 4, 5, \dots, N.$$

Результаты вычислений параметров данной и последующих моделей динамики топливных ресурсов и их статистического анализа приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов параметров математических моделей динамики топливных ресурсов

Модель		Коэффициенты модели						$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
№	Формула	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6			
1	(2)	0,657	0,041	-0,166	0,29	-0,004	-0,00011	0,020	4,3	2,13
2	(3)	0,791	0,121	-0,0014	-0,0001	—	—	0,035	5,3	1,66
3	(6)	0,766	0,133	-0,0018	—	—	—	0,035	5,3	1,60
4	(7)	0,915	0,672	-0,01621	—	—	—	0,047	5,9	1,40

Проверка значимости параметров построенной модели (2) показала, что критерии Стьюдента для параметров λ_2 и λ_3 меньше критических значений; следовательно, значения полученных коэффициентов являются незначимыми.

С учетом сделанного вывода была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения первого порядка с полиномиальным трендом второго порядка (3):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_4 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 2, 3, 4, \dots, N.$$

Поскольку в модели (3) согласно результатам исследований незначимым оказался параметр λ_4 , то математическую модель динамики топливных ресурсов можно упростить к виду (6):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \varepsilon_k, \quad k = 2, 3, 4, \dots, N.$$

Также была рассмотрена модель динамики трудовых ресурсов в форме ковариационно-стационарной стохастической модели временного ряда, построенной на основе линейного тренда, в которой случайное возмущение описывается авторегрессионной моделью временного ряда первого порядка

$$\begin{cases} y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \eta_k, & k = 0, 1, \dots, N-1; \\ \eta_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\lambda_1^2}}, & \eta_k = \lambda_1 \eta_{k-1} + \varepsilon_k, & k = 1, 2, \dots, N-1, \end{cases}$$

или в виде (7)

$$\begin{cases} y_0 = y_0 - \sqrt{1-\lambda_1^2} (y_0 - \lambda_2 - \lambda_3 t_0) + \varepsilon_0; \\ y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 - \lambda_3 t_{k-1}) + \varepsilon_k, & k = 1, 2, \dots, N-1. \end{cases}$$

Для проведения сравнительного анализа различных моделей были также рассчитаны прогнозные значения динамики трудовых ресурсов адаптивным методом Брауна [2, 3].

Статистический анализ полученных результатов показал, что построенные модели (2), (3), (6) и (7) обладают достаточно хорошими аппроксимативными свойствами и высокой степенью адекватности.

С целью окончательного выбора наилучшей математической модели для описания динамики топливных ресурсов также была проведена оценка погреш-

ностей ретроспективных прогнозов по данным 20 лет на 1 год вперед. Усредненные значения относительных погрешностей прогнозов и усредненные радиусы доверительных интервалов в относительных единицах графически отображены на рис. 5 в сравнении с методом Брауна (модель под номером 5).

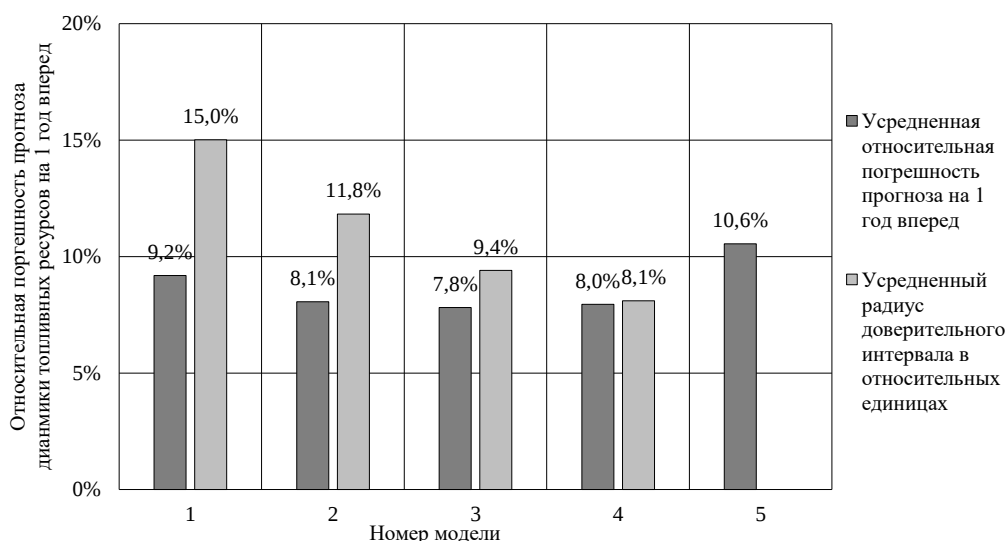


Рис. 5. Сравнительный анализ усредненных значений относительных погрешностей прогнозов и усредненных радиусов доверительных интервалов для моделей (2), (3), (6) и (7)

Также были исследованы прогнозные свойства моделей (2), (3), (6) и (7). Для этого были построены прогнозы на 1, 2, 3, 4 и 5 лет на даты с 2010 по 2021 год по выборкам результатов наблюдений за предыдущие $N = 20$ лет. Усредненные результаты погрешностей прогнозов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Погрешности прогноза динамики топливных ресурсов, сделанного на основе исследуемых математических моделей, %

Количество лет, на которые сделан прогноз	Номер модели				
	1	2	3	4	5
1	9,2	8,1	7,8	8,0	10,6
2	12,9	12,8	10,0	9,1	14,3
3	16,9	18,1	13,5	12,4	22,3
4	17,6	21,2	16,1	11,7	29,4
5	19,5	23,8	18,3	11,7	35,2

По результатам анализа относительных ошибок прогнозов при использовании различных математических моделей (2), (3), (6) и (7) наилучшей моделью является модель 4 (формула 6), которая обладает наименьшими ошибками прогнозов по сравнению с остальными.

На рис. 6 продемонстрированы усредненные значения погрешностей прогнозов динамики топливных ресурсов, рассчитанные по модели 4 и методу экспоненциального сглаживания Брауна.

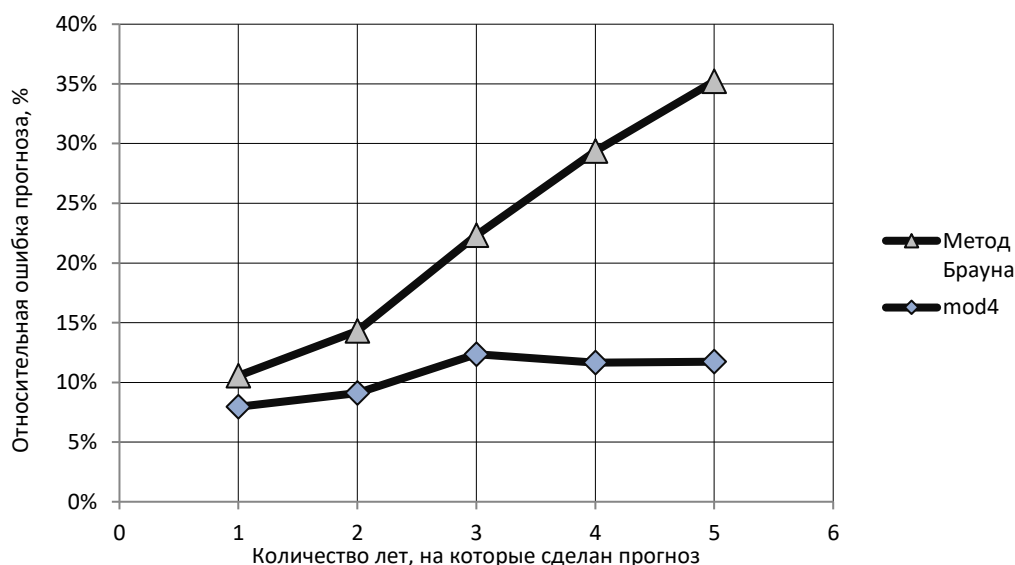


Рис. 6. Значения усредненных погрешностей ретроспективных прогнозов динамики топливных ресурсов, рассчитанные по модели 4 (формула 7) и методом Брауна

Построение имитационной системы управления деятельностью региональной энергосистемы Самарской области

Для повышения эффективности работы сложных развивающихся систем необходимо целенаправленное, стратегическое управление их деятельностью. Одним из направлений стратегии развития энергетического предприятия является процесс обновления основного капитала. В качестве инструмента выработки подобных управленческих решений и оценки их эффективности можно использовать системы поддержки принятия решений (СППР) на основе имитационной модели функционирования энергосистемы.

Имитационное моделирование дает возможность анализировать и вскрывать сущность протекающих производственно-экономических процессов, конструировать и совершенствовать стратегии управления промышленными производствами, повышать эффективность управления и использования ресурсов.

Для энергосистемы Самарской области была сконструирована одноконтурная имитационная модель системы управления (рис. 7).

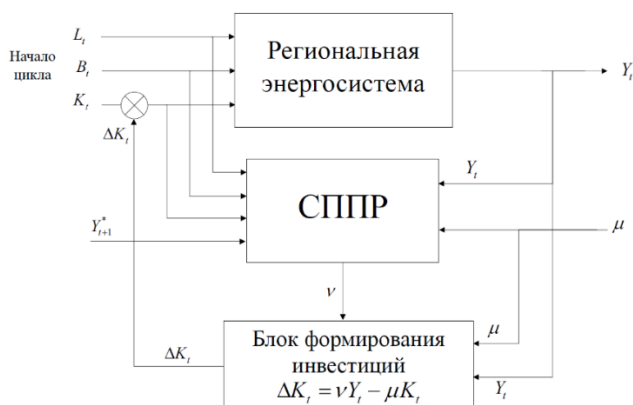


Рис. 7. Имитационная система управления энергосистемой Самарской области

В контуре управления энергосистемой моделируется формирование инвестиций на обновление капитальных ресурсов K_{t+1} за счет доли прибыли от выпуска продукции Y_t с помощью управляющей величины ν .

Особенностью производства тепловой и электрической энергии является то, что объемы производства в первую очередь определяются потребностями промышленных и коммунальных потребителей, а запасы энергии невозможно хранить. Таким образом, величина выпуска суммарной энергии на будущий год Y_{t+1}^* задается в определенных размерах потребностями потребителей.

С учетом специфики производства энергии будем считать, что изменения управляющих переменных возможны с периодом, равным длительности одного технологического цикла (1 год).

Объем инвестиций на обновление капитальных ресурсов определяется следующим образом:

$$I_{t+1} = \nu \cdot Y_t.$$

На величину ν накладывается естественное ограничение $0 \leq \nu \leq 1$.

Кроме этого, при определении величины капитальных ресурсов необходимо учитывать коэффициент выбытия основных фондов μ – долю капитальных ресурсов, выведенных из эксплуатации за отчетный период. Согласно статистическим данным энергетических производств значение коэффициента выбытия основных фондов μ определяется равным 0,05 в соответствии с планом проведения текущих и капитальных ремонтов основных фондов энергосистемы.

Тогда величина капитальных ресурсов следующего периода будет складываться из стоимости основных фондов текущего периода с учетом выбытия основных фондов и величины инвестиций:

$$K_{t+1} = (1 - \mu) \cdot K_t + I_{t+1} = (1 - \mu) \cdot K_t + \nu \cdot Y_t = K_t + \Delta K_t. \quad (8)$$

В результате преобразований получим величину изменения объема капитальных ресурсов на будущий год в следующем виде:

$$\Delta K_t = \nu \cdot Y_t - \mu \cdot K_t. \quad (9)$$

Для формирования математически оправданных решений при определении величины инвестиций в обновление капитальных ресурсов на будущий год в контуре имитационной модели была использована система поддержки принятия решений (СППР), структура которой приведена на рис. 8.

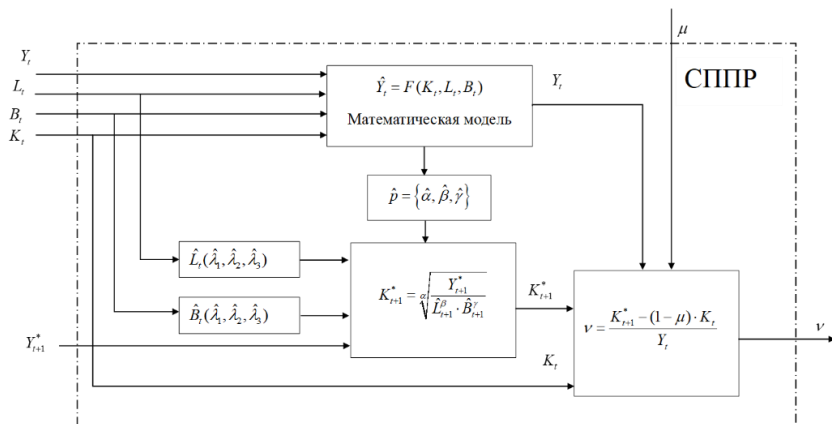


Рис. 8. Структура системы поддержки принятия решений

Сформированная СППР выполняет следующие задачи: на основе статистических данных функционирования энергосистемы происходит построение математической модели ее функционирования, проводятся статистический анализ результатов моделирования и оценка качества модели, определяются прогнозные значения объемов используемых трудовых и топливных ресурсов на следующий год, формируются рекомендации по величине капитальных ресурсов на будущий год в виде управляющей величины ν .

В качестве математической модели, описывающей деятельность энергосистемы для использования в СППР, была выбрана ковариационно-стационарная модель, построенная на основе нелинейной регрессионной модели со случайным возмущением, описываемым авторегрессией первого порядка, построение, идентификация и анализ которой проводились в работе [1]:

$$y_k = \lambda_2 x_{1k}^{\lambda_3} x_{2k}^{\lambda_4} x_{3k}^{\lambda_5} + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 x_{1,k-1}^{\lambda_3} x_{2,k-1}^{\lambda_4} x_{3,k-1}^{\lambda_5}) + \varepsilon_k; \quad k = 1, 2, 3, \dots, N-1, \quad (10)$$

где x_{1k} , x_{2k} , x_{3k} – значения объемов затрачиваемых капитальных, трудовых и топливных ресурсов соответственно; $\lambda_i, i = 1, \dots, 5$ – коэффициенты нелинейной регрессионной модели.

Анализ результатов идентификации данной математической модели для временного интервала 1990–2021 гг. показал, что она обладает хорошими аппроксимативными и прогнозными свойствами. Результаты расчетов параметров модели и их статистический анализ приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчетов параметров математической модели динамики производства энергии

Коэффициенты модели					$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5			
0,684	0,965	-0,128	0,016	0,945	0,012	3,3	1,9

В качестве математических моделей динамики трудовых и топливных ресурсов в СППР использовались модели (6) и (7), рассмотренные выше.

На основе выбранных моделей было проведено имитационное моделирование производства энергии энергосистемы Самарской области по выборке объемом 21 год, с 2000 по 2020 гг., на 1 год вперед.

Согласно модели (10) сценарий снижения прогнозируемого уровня производства энергии на 2021 год составляет 0,45 (интегральный выпуск энергии на 3,00 % ниже уровня производства в 2020 г.) и обеспечивается величиной ν , равной 0,26.

Для сценария стабильного отпуска энергии, при котором величина производства энергии останется неизменной с 2020 по 2021 гг., доля инвестиций в капитальные ресурсы должна быть равна $\nu = -0,27$. Сценарий увеличения энергопроизводства на 3 % обеспечивает управляющая величина $\nu = -0,65$.

Получившиеся отрицательные значения величины при планируемом росте или как минимум постоянстве выпуска энергии связаны с тем, что в энергосистеме имеется избыток основных фондов и для повышения эффективности производства энергии необходимо затрачивать дополнительные средства на поддержание резервов мощностей, а также демонтаж старого оборудования в случае необходимости.

Заключение

Проведен сравнительный анализ известных моделей и методов прогнозирования динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов энергетическими системами, основанных на экспоненциальном сглаживании.

Для описания динамики основных ресурсов предложены ковариационно-стационарные стохастические модели временных рядов в форме разностных уравнений с детерминированным полиномиальным трендом. На основе статистического анализа результатов параметрической идентификации предложенных моделей были выбраны наиболее эффективные математические модели с наименьшими ошибками прогнозов.

На основе построенных моделей разработаны одноконтурная имитационная модель системы управления энергосистемой и структура системы поддержки принятия решений, позволяющие разрабатывать управленческие решения по обновлению капитальных фондов и повышать эффективность деятельности энергосистемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зотеев В.Е., Сагитова Л.А., Гаврилова А.А.* Разработка и сравнительный анализ математических моделей функционирования региональной энергосистемы Самарской области // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2024. Т. 28. № 2. С. 375–399.
2. *Gavrilova A., Salov A., Sagitova L.* System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara. 2019. Pp. 736–741. doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976644. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644> (accessed April 16, 2024).
3. *Гаврилова А.А., Цапенко М.В.* Синтез математических моделей региональной энергосистемы как многомерных производственных функций // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Технические науки. 2002. Вып. 14. С. 126–192.
4. *Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В.* Построение и идентификация математических моделей производственных систем. Самара: Офорт, 2006. 126 с.
5. *Сагитова Л.А.* Структура алгоритма системы поддержки принятия решений повышения энергоэффективности регионального энергетического комплекса // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 256–262.
6. *Колемаев В.А.* Эконометрика: учебник. М.: ИНФРА-М, 2004. 160 с.
7. *Гармаш А.Н., Орлова И.В., Федосеев В.В.* Экономико-математические методы и прикладные модели: учебник для бакалавриата и магистратуры. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2022. 328 с.
8. *Кашияп Р.Д., Рао А.Р.* Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным: Пер. с англ. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 384 с.
9. *Бокс Д., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
10. *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 756 с.
11. *Кендалл М., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
12. *Отнес Р., Энксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 428 с.
13. *Замков О.О., Толстомятенко А.В., Черемных Ю.Н.* Математические методы в экономике. М.: МГУ, «ДИС», 1997. 368 с.
14. *Вучков И., Бояджиева Л., Солаков О.* Прикладной линейный регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1987. 238 с.
15. *Draper N.R., Smith H.* Applied Regression Analysis / Wiley Series in Probability and Statistics. New York: John Wiley & Sons, 1998. doi: 10.1002/9781118625590.
16. *Демиденко Е.З.* Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.

17. *Darbin J., Watson G.* Testing for serial correlation in least squares regression // *Biometrika*. Vol. 58. 1971. P. 1.

Статья поступила в редакцию 12.09.2024 г.

FORECAST MODELING OF THE DYNAMICS OF MAIN RESOURCES AND CONSTRUCTION OF A SIMULATION SYSTEM FOR MANAGING THE ACTIVITIES OF THE REGIONAL ENERGY SYSTEM OF THE SAMARA REGION

V.E. Zoteev, L.A. Sagitova, A.A. Gavrilova¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zoteev-ve@mail.ru, l0410@mail.ru, a.a.gavrilova@mail.ru

Abstract. Regional energy systems are complex dynamic systems that operate in conditions of constant changes in the external environment. In this regard, the task of developing complex management decisions and conducting a systemic analysis of the efficiency of its activities arises. To solve this problem, it is necessary to improve the mathematical models of the dynamics of capital, labor and fuel resources, since they have the greatest impact on the energy output of the energy system.

The paper analyzes existing methods of mathematical description of the dynamics of basic resources and their shortcomings. The paper considers covariance-stationary models of time series in the form of difference equations with a deterministic polynomial trend. The paper presents the results of mathematical modeling of the dynamics of capital, labor and fuel resources based on statistical data on the activities of the energy system of the Samara Region, published in the annual reports of regional ministries and energy companies, and conducts a statistical analysis of them.

Based on a comparative analysis of mathematical models, the most effective models of the dynamics of capital, labor and fuel resources with the best predictive qualities were selected.

Also, in the work, a single-loop simulation model of the energy system management system was constructed by forming investments for the renewal of capital resources and the structure of the decision support system (DSS) was developed, allowing the formation of mathematically sound management decisions.

Keywords: power system, energy efficiency, basic resources, covariance-stationary time series models, statistical analysis, simulation model of control, decision support system.

REFERENCES

1. Zoteev V.E., Sagitova L.A., Gavrilova A.A. Development and comparative analysis mathematical models of functioning of the samara regional energy system // Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki. 2024. Vol. 28. No. 2. Pp. 375–399. (In Russian).
2. Gavrilova A., Salov A., Sagitova L. System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). 2019. Pp. 736–741, doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976644. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644> (accessed April 16, 2024).
3. Gavrilova A.A., Capenko M.V. Synthesis of mathematical models of the regional energy system as multidimensional production functions // Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Techn. Nauki. 2002. Issue 14. Pp. 126–192. (In Russian).
4. Diligenskij N.V., Gavrilova A.A., Capenko M.B. Postroenie i identifikaciya matematicheskikh modelej proizvodstvennykh sistem: Uchebnoe posobie [Construction and identification of



© The Author(s), 2024

¹ Vladimir E. Zoteev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Lyaysan A. Sagitova, assistant professor.

Anna A. Gavrilova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

- mathematical models of production systems: Tutorial]. Samara: Ofort, 2005. 126 p. (In Russian).
5. *Sagitova L.A.* Struktura algoritma sistemy podderzhki prinyatiya reshenij povysheniya energoefektivnosti regional'nogo energeticheskogo kompleksa [The structure of the algorithm of the decision support system for increasing the energy efficiency of the regional energy complex] // *Infokommunikacionnye tekhnologii*. 2021. Vol. 19. No. 2. Pp. 256–262 (In Russian).
 6. *Kolemaev V.A.* E'konometrika: uchebnik [Econometrics: textbook]. Moscow: INFRA-M, 2004. 160 pp. (In Russian).
 7. *Garmash A.N., Orlova I.V., Fedoseev V.V.* Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli: uchebnik dlya bakalavriata i magistratury. 4-e izd., pererab. i dop. [Economic and Mathematical Methods and Applied Models: Textbook for Bachelor's and Master's Degrees. 4th ed., revised and enlarged]. Moscow: Yurajt, 2022. 328 p. (In Russian).
 8. *Kashyap R.D., Rao A.R.* Postroenie dinamicheskikh stohasticheskikh modelej po eksperimental'nym dannym. Per. s angl. [Construction of dynamic stochastic models based on experimental data. Translated from English] M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1983. 384 pp. (In Russian).
 9. *Boks D., Dzhenkins G.* Analiz vremennyh ryadov. Prognoz i upravlenie [Time series analysis. Forecast and management]. M.: Mir, 1974. Issue 1. 406 p. (In Russian).
 10. *Anderson T.* Statisticheskij analiz vremennyh ryadov [Statistical analysis of time series.] M.: Mir, 1976. 756 p. (In Russian).
 11. *Kendall M., St'yuart A.* Mnogomernyj statisticheskij analiz i vremennye ryady [Multivariate statistical analysis and time series.] M.: Nauka, 1976. 736 p. (In Russian).
 12. *Otnes R., Enokson L.* Prikladnoj analiz vremennyh ryadov. Osnovnye metody [Applied time series analysis. Basic methods]. M.: Mir, 1982. 728 p. (In Russian).
 13. *Zamkov O.O., Tolstopyatenko A.V., Cheremnyh Yu.N.* Matematicheskie metody v ekonomike [Mathematical Methods in Economics]. M.: MGU, DIS, 1997. 368 p. (In Russian).
 14. *Vuchkov I., Boyadzhieva L., Solakov O.* Prikladnoj linejnij regressionnyj analiz [Applied linear regression analysis]. M.: Finansy i statistika, 1987. 238 p. (In Russian).
 15. *Draper N.R., Smith H.* Applied Regression Analysis / Wiley Series in Probability and Statistics. New York: John Wiley & Sons, 1998. doi: 10.1002/9781118625590
 16. *Demidenko E.Z.* Linejnaya i nelinejnaya regressii [Linear and nonlinear regression.] M.: Finansy i statistika, 1981. 302 pp. (In Russian).
 17. *Darbin J., Watson G.* Testing for serial correlation in least squares regression // *Biometrika*. Vol. 58. 1971. P. 1.

Original article submitted 12.09.2024