УДК 519.71(043.3) DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.23

А.Г. САЛОВ
А.А. ГАВРИЛОВА
П.А. КНЯЗЕВА
В.А. КРУГЛОВ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ТРЕХФАКТОРНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ФУНКЦИИ

SIMULATION MODEL OF REGION ENERGY SYSTEM ON THE BASE OF THREE-FACTOR PRODUCTION FUNCTION

Представлены построенные модели энергетической производственной системы на примере регионального энергетического комплекса Самарской области в виде производственных функций. Определены основные ресурсы, используемые энергетической системой. Методом наименьших квадратов идентифицированы параметры моделей, характеризующие эффективность использования ресурсов, проведена оценка качества производственных функций. Синтезированы модели управления областным энергетическим комплексом с учетом внутренних и внешних инвестиций. Исследована управляемость региональной энергетической системы с помощью имитационного моделирования, определены границы эффективного управления, построены различные прогнозные сценарии функционирования.

Ключевые слова: *тепловая и электрическая энергия, энергетическая система, производственная функция, эффективность, управление, имитационное моделирование, энергосбережение, выпуск продукции, используемые ресурсы*

The article shows models of energy production system by the example of Samara region energy system on the base of production functions. The main resources are determined. Model parameters characterizing effectiveness of resources use are identified by the method of least squares. Quality evaluation of production functions is done. Models of region energy system management are constructed in the light of internal and external investments. Controllability of region energy system is examined with simulation modeling. Boundaries of efficient control are defined. Different functioning forecasts are proposed.

Keywords: *heat and electric energy, energy system, production function, effectiveness, management, simulation model, energy saving, output, resources*

Повышение эффективности функционирования промышленных объектов на основе рационального использования производственных ресурсов является важным направлением развития производственно-экономических систем [1–5].

В соответствии с этим актуальными представляются проблемы оценки эффективности использования ресурсов и функционирования различных производственно-экономических систем: от отраслевых производственно-хозяйственных комплексов до первичных звеньев экономики – промышленных объединений и предприятий.

В статье предложены математические модели энергетической производственной системы на примере регионального энергетического комплекса Самарской области. В качестве основы моделей использовалась производственная функция Кобба-Дугласа. Методом наименьших квадратов идентифицированы параметры моделей, характеризующие эффективность использования ресурсов, проведен качественный анализ полученных моделей [6–10], из которых выбрана наиболее адекватная объекту, и на её основе построены имитационные модели управления. Даны прогнозы функционирования регионального энергетического комплекса.

Объектом исследования является региональный энергетический комплекс Самарской области [11]. На рис. 1 приведены графики изменения

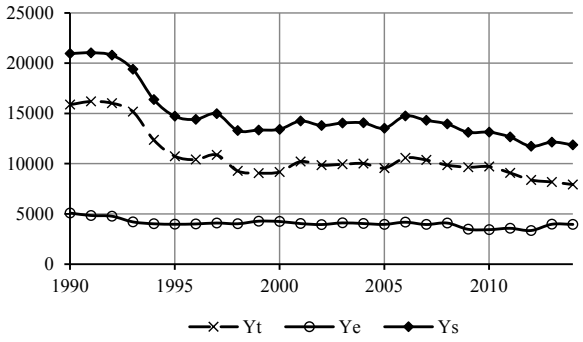

Рис. 1. Энергосистема 1990–2014 гг.: Yt – отпуск тепловой энергии; Ye – отпуск электроэнергии; Ys – суммарный отпуск энергии, Дж*10^{13}

суммарного *Ys(t)* электрического *Ye(t)* и теплового *Yt(t)* отпуска энергии в период 1990–2014 гг.

Анализ зависимостей, приведенных на рис.1, показывает, что начиная с 1992 г. происходит резкий спад потребления тепловой энергии и, как следствие, суммарной энергии. В этих условиях по статистическим данным наблюдается значительный рост капитальных ресурсов и падение трудовых ресурсов в период 1992-2014 гг. в два раза. Произошедшее существенно изменило режимы работы генерирующих предприятий, что привело к росту себестоимости отпускаемой тепловой и электрической энергии в 1,4 раза [12]. Сравнение осуществляется в сопоставимых ценах, приведенных к 1990 г.

Для описания энергетической системы используем трехфакторную модель в виде производственной функции типа Кобба-Дугласа [13]:

$$Y(t) = AK(t)^{\alpha} L(t)^{\beta} B(t)^{\gamma}, \qquad (1)$$

где *Y(t)* – количество отпущенной энергии; *K(t)* – основные фонды; *L(t)* – трудовые ресурсы; *B(t)* – топливные ресурсы; α, β, γ – коэффициенты эластичности выпуска по фондам, труду и топливу; *A* – масштабный коэффициент, характеризующий интегральную эффективность.

Параметры модели идентифицированы методом наименьших квадратов [7]:

$$\sum_{i=1}^{T} \left(Y(t_i) - Y_m(t_i)\right)^2 \to \min.$$

Проведен анализ аппроксимативных свойств модельной зависимости с помощью коэффициентов детерминации, среднеквадратичных отклонений, значений t-критерия Стьюдента, F-критерия Фишера и критерия Дарбина-Уотсона, которые свидетельствуют о высоком качестве модели [12]. Сопоставление результатов моделирования и реальных статистических данных функционирования регионального энергетического комплекса представлено на рис. 2.

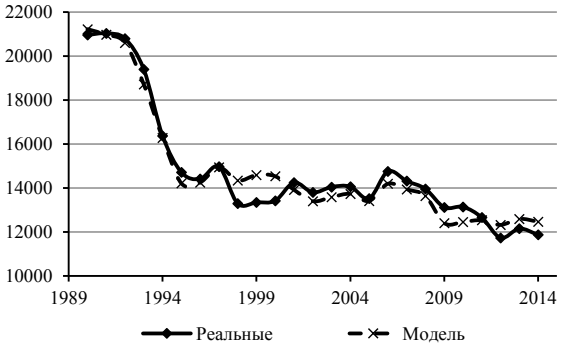

Рис. 2. Отпуск суммарной энергии, Дж*10^{13}

Статистические показатели качества аппроксимации показывают, что модель обладает хорошими описательными свойствами. Так, коэффициент детерминации R^2 составил 0,958, он является значимым, так как F-статистика значительно превышает табличные значения [10]. Среднеквадратичная невязка не превышает 4,44 %. Наиболее достоверны величины эластичности выпуска по топливным и трудовым ресурсам – γ, так как $t \geq 2$. Коэффициент Дарбина-Уотсона равен 0,73, что позволяет использовать математическую модель для построения краткосрочных прогнозов.

Идентифицированные параметры модели – эластичности являются логарифмическими функциями чувствительности выходной величины к изменению соответствующего ресурса. Модельный анализ показал, что увеличение трудовых ресурсов на 1 % приведет к росту выпуска продукции на 0,065 %. Эластичность капитальных ресурсов отрицательна и близка к нулю, что характеризует низкую эффективность использования ресурса, т.е. отдача от основного оборудования низка [11]. Это соответствует тому, что при произошедшем в эти годы резком падении объёмов энергопроизводства затрагиваемые ресурсы остались практически неизменными и объективно существующие излишки ресурсов не вносят никакого вклада в деятельность энергосистемы.

Наибольшее положительное влияние на энергетическое производство оказывают топливные ресурсы, величина эластичности выявила близкую к линейной зависимость.

Рис. 3. Структура системы управления с учетом внутренних инвестиций

Для исследования эффективности управления энергетическим производством проведено имитационное моделирование [16, 17]. Построены две системы управления энергетическим комплексом, отличающиеся между собой источником инвестиций.

1. Система управления с учетом *внутренних* инвестиций (рис. 3) [18].

В качестве модели энергосистемы примем трехфакторную неоднородную производственную функцию (1), адекватно описывающую реальные процессы в региональном энергетическом комплексе.

Полагаем, что ежегодные инвестиции в региональный энергетический комплекс складываются из дохода согласно управляющей переменной – доли инвестиций в структуре ежегодного выпуска продукции:

$$I(t) = sY(t-1),$$

где $Y(t–1)$ – величина выпуска продукции предыдущего года.

Тогда капитальные ресурсы текущего периода складываются из стоимости основных фондов предыдущего периода и величины внутренних инвестиций:

$$K(t) = K(t-1) + I(t).$$

2. Система управления с учетом *внутренних* и *внешних* инвестиций (рис. 4).

В качестве базовой управляющей переменной взят капитал K. Уравнение *для* изменения капитала ΔK запишем в форме баланса приходов и расходов финансовых ресурсов за промежуток времени Δt:

$$\Delta K = (P - R)\Delta t,$$

где P – приход финансовых ресурсов; R – расход ресурсов.

В качестве прихода финансовых ресурсов P примем сумму стоимости произведенной продукции за предыдущий год $Y(t–1)$ и внешних инвестиций $I_{внеш}$:

$$P=Y(t–1)+ I_{внеш}.$$

В качестве модели энергосистемы, как и в первой системе управления, используем трехфакторную неоднородную производственную функцию (1), обладающую хорошими аппроксимативными свойствами.

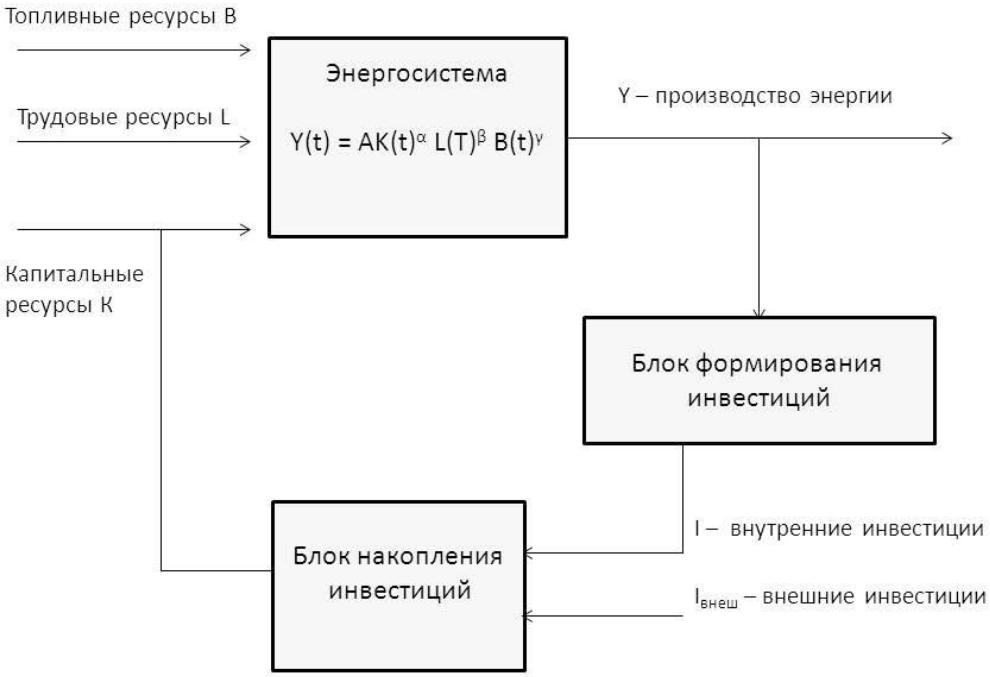

Рис. 4. Структура системы управления с учетом внешних и внутренних инвестиций

Расходом финансовых ресурсов будет являться внутреннее потребление в комплексе П и затраты на реновацию капитала Q:

$$R = \Pi + Q.$$

Внутреннее потребление примем пропорциональным произведенной продукции :

$$\Pi = \mu Y,$$

где μ – предельная норма потребления.

Затраты на реновацию примем пропорциональными используемому капиталу:

$$Q = aK,$$

где a – темп обновления капитала.

Расчеты по модели будем выполнять для дискретных моментов времени $t = n\Delta t$, где n = 0,1,2,..., положив Δt = 1 год. Тогда уравнение для расчета капитала регионального энергетического комплекса в n + 1 году примет вид рекуррентного соотношения

$$K(t) = b(K(t-1))^{\alpha} - \mu b(K(t-1))^{\alpha} - \\ -(a-1)K(t-1) + I_{\text{внеш}},$$

где b рассчитывается по формуле $b = AL^{\beta}B^{\gamma}$.

В результате имитационного моделирования получены прогнозные сценарии [19] функционирования областной энергосистемы, представленные на рис. 5 и 6. Определены величины управляющего воздействия, которые позволяют обеспечить рост, стабилизацию или снижение выпуска продукции региональным энергетическим комплексом.

При имитационном моделировании переменной функцией является доля инвестиций в структуре ежегодного выпуска продукции . Она варьировалась в диапазоне от –0,2 до +0,2. При оптимистичном прогнозном сценарии принималась равной –0,2 и расчет показал, что отпуск энергии вырос более чем на 1 %. При нейтральном прогнозе принималась равной 0, что приводит с падению выпуска на 0,5 %. При пессимистичном прогнозном сценарии принималась равной +0,2, в результате отпуск энергии снижается более чем на 1,5 %. В целом, результаты имитационного моделирования подтвердили отрицательное влияние увеличения внутренних инвестиций на производство энергии, что свидетельствует об избытке основных фондов. Вложение инвестиций в существующее оборудование, даже в ремонт, не может привести к увеличению выпуска продукции.

Для исследования эффективности внедрения новых технологий используем систему управления,

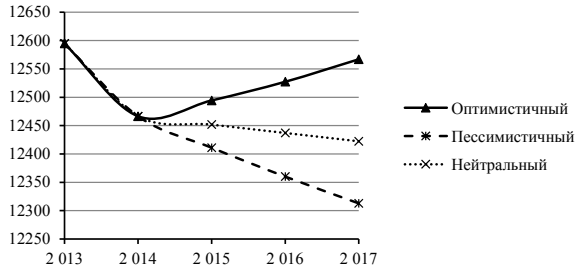

Рис. 5. Прогнозы выпуска суммарной энергии с учетом внутренних инвестиций, Дж*10^{13}

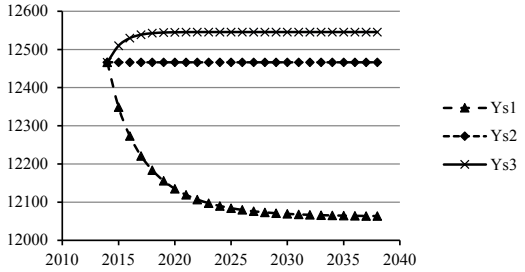

Рис. 6. Прогнозы выпуска суммарной энергии с учетом внутренних и внешних инвестиций, Дж*10^{13}

учитывающую внешние источники финансирования. При имитационном моделировании управляющей величиной является коэффициент реновации , меняющийся в диапазоне от 0,2 до 0,6. При оптимистичном прогнозе Ys1 принимался равным 0,6 и расчет показал, что отпуск энергии вырос более чем на 0,6 %. Стабильный отпуск энергии Ys2 потребителям на нынешнем уровне требует обновления капитальных ресурсов с темпом 0,47. Прирост капитальных ресурсов с меньшим темпом реновации приведет к падению выпуска продукции Ys3.

Таким образом, анализ полученных прогнозных траекторий позволяет определить граничные значения доли внутренних инвестиций, которые приводят к повышению себестоимости отпуска энергии. Для повышения эффективности генерации необходимо сокращение неиспользуемого оборудования и внедрение новых технологий, которые в свою очередь требуют значительных капитальных вложений.

Выводы. 1. Полученные математические модели адекватно описывают деятельность регионального энергетического комплекса.

2. Построены имитационные модели, позволяющие исследовать прогнозные сценарии развития энергетической системы.

3. Расчет прогнозных сценариев развития по имитационным моделям позволил определить граничные значения внутренних и внешних инвестиций, за пределами которых инвестиции становятся неэффективными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гаврилова А.А., Салов А.Г.* Повышение эффективности управления энергетическим комплексом как фактор социально-экономического развития Поволжского региона // Межд. форум «Россия как трансформирующееся общество: экономика, культура, управление», г. Оренбург // Интеллект, инновации, инвестиции. 2011(спец. выпуск). С.24–29.

2. Надёжность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС / под ред. А.И. Андрющенко. М.: Высшая школа, 1991. 303 с.

3. *Баранов Г.Л., Марченко Б.Г., Приймак Н.В.* Построение модели и анализ стохастических периодических нагрузок энергосистем // Известия академии наук. Энергетика и транспорт. 1991. №2. С.12 –21.

4. *Бравермaнн Э.М.* Математические модели планирования и управления в экономических системах. М.: Наука, 1976. 368 с.

5. *Егоров Ю.В.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами // Математика на службе инженера. Основы теории оптимального управления. М.: Знание, 1973. С. 187 – 199.

6. *Замков О.О., Толстопятенко А.В., Черемных Ю.Н.* Математические методы в экономике. М.: МГУ, 1997. 168 с.

7. *Зоркальцев В.И.* Методы наименьших квадратов: геометрические свойства, альтернативные подходы, приложения. Новосибирск: ВО «Наука», 1995. 220 с.

8. Имитационный подход к изучению больших систем энергетики. Иркутск: СЭИ, 1986. 171 с.

9. *Иозайтис В.С., Львов Ю.А.* Экономико-математическое моделирование производственных систем. М.: Высш. шк., 1991. 192 с.

10. *Мюллер П.* и др. Таблицы по математической статистике / пер. с нем. и предисл. В.М. Ивановой. М.: Финансы и статистика, 1982. 271 с.

11. *Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В.* Построение и идентификация математических моделей производственных систем: учебное пособие. Самара, 2005. 126 с.

12. *Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Салов А.Г., Гаврилов В.К.* Модельный анализ эффективности совместного производства тепловой и электрической энергии региональной энергосистемой // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. «Технические науки». Новочеркасск, 2008. №5 (147). С. 37–40.

13. *Терехов Л.Л.* Производственные функции. М.: Статистика, 1974. 128 с.

14. *Гаврилова А.А.* Организация управления энергетическим производством на основе комплексных критериев деятельности // Вестник Волжского университета им. В.Н.Татищева. 2015. №1 (23). С. 11–16.

15. *Салов А.Г., Гаврилова А.А., Иванова Д.В.* Исследование характеристик регионального промышленного комплекса методами статистического и модельного анализа // Научное обозрение. 2015. №15. С.327–332.

16. *Гаврилова А.А.* Применение имитационного моделирования для анализа устойчивости производственно-экономического объекта // Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9. №4. С.67–72.

17. *Салов А.Г., Гаврилова А.А., Иванова Д.В.* Имитационное моделирование эффективности функционирования макроэкономического объекта по экологическому критерию // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13. №2. С.176–182.

18. *Князев П.А., Круглов В.А.* Исследование устойчивости функционирования ТЭЦ // Радиоэлектроника, электротехника, энергетика: XXI Межд. науч. конф. Т.3 / МЭИ. М., 2015. С. 245.

19. *Журавлёв В.Г., Мамицкий М.Ф.* Прогнозирование потребления электроэнергии с использованием классификационного подхода // Известия Академии наук СССР. 1988. №5. С.25–29.

Об авторах:

САЛОВ Алексей Георгиевич
доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,
тел. (846) 337-81-03
E-mail: aleksey-salov@rambler.ru

ГАВРИЛОВА Анна Александровна
кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа в теплоэнергетических и социотехнических комплексах
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: a.a.gavrilova@mail.ru

КНЯЗЕВ Павел Андреевич
магистрант кафедры управления и системного анализа в теплоэнергетических и социотехнических комплексах
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: comprusmad@inbox.ru

КРУГЛОВ Виталий Александрович
магистрант кафедры управления и системного анализа в теплоэнергетических и социотехнических комплексах
Самарский государственный технический университет
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: kruglov_vitalya@inbox.ru

SALOV Aleksey G.
Doctor of Engineering Science, Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State University of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194,
tel. (846) 337-81-03
E-mail: aleksey-salov@rambler.ru

GAVRILOVA Anna A.
PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Management and System Analysis in Thermal Power and Socio-technical Complexes Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: a.a.gavrilova@mail.ru

KNYAZEV Pavel A.
Master's Degree Student of the Management and System Analysis in Thermal Power and Socio-technical Complexes Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: comprusmad@inbox.ru

KRUGLOV Vitaly A.
Master's Degree Student of the Management and System Analysis in Thermal Power and Socio-technical Complexes Chair
Samara State Technical University
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: kruglov_vitalya@inbox.ru

Для цитирования: *Салов А.Г., Гаврилова А.А., Князев П.А., Круглов В.А.* Имитационное моделирование деятельности генерирующего комплекса на основе трехфакторной производственной функции // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №3(24). С. 140-145. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.23.
For citation: *Salov A.G., Gavrilova A.A., Knyazev P.A., Kruglov V.A.* Simulation model of region energy system on the basis of three-factor production function // Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture. 2016. №3(24). Pp. 140-145. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.03.23.