УДК 621.311.1

Е. В. Быкова, М. В. Гродецкий

АНАЛИЗ И МОНИТОРИНГ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ИНДИКАТОРОВ МЕТОДОМ УСЛОВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Приведено краткое описание структуры вычислительного комплекса для мониторинга и анализа энергетической безопасности. Описано его приложение для прогноза значений индикаторов и методы, разработанные для него.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, мониторинг, прогнозирование

Мониторинг энергетической безопасности Молдовы осуществляется с помощью индикативного анализа. На основе системного подхода сформирована система индикаторов, которая отражает все этапы энергоснабжения потребителей и отвечает определению энергетической безопасности: «Энергетическая безопасность — это состояние защищенности страны (региона), ее граждан, общества, государства и экономики от угрозы дефицита в обеспечении потребностей в энергии экономически доступными топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР) приемлемого качества в нормальных условиях и в чрезвычайных обстоятельствах, а также от угрозы нарушения стабильности топливо- и энергоснабжения» [4].

Система индикаторов включает более 40 индикаторов, которые отражают структуру и состояние секторов ТЭК (топливного, электроэнергетического и теплоэнергетического), а также учитывают экономические, экологические, социальные аспекты. В вычислительном комплексе энергетическая безопасность рассматривается как центральная составляющая, в отдельные дополнительные направления выделены экономическая и экологическая безопасность [2, 3, 7].

Комплекс содержит информационный, расчетный и аналитический модули, предусмотрены приложения для прогнозирования и моделирования сценариев развития энергетики, моделирования угроз и определения уровней энергетической безопасности при этом. Модульное построение позволяет расширить вычислительный комплекс по мере необходимости (рис. 1) [5].

Доступ к блокам и индикаторам осуществляется через стартовую страницу (рис. 2), исходные данные систематизированы в Файле исходных данных, который представляет собой базу данных Excel. Отдельным приложением комплекса также является аналогичная база данных по энергетике, реализованная в программе Access.

Исходные данные используются при расчете значений индикаторов, их пороговых значений, балльной оценки состояния как каждого индикатора, так и блоков и всей системы индикаторов согласно методологии индикативного анализа.

Для повышения энергетической безопасности на основе проведенных исследований составлен и ежегодно корректируется перечень первоочередных мероприятий, которые необходимо осуществлять для достижения нормального уровня состояния энергетической безопасности. Важным является вопрос об оптимальном вложении средств в поддержание и развитие энергетики для удовлетворения как текущего, так и перспективного спроса на электроэнергию, тепловую энергию, ТЭР при двух случаях — при сохранении существующего положения дел и при внедрении мероприятий, направленных на улучшение состояния энергетики.

В связи с этим задачу можно рассматривать для разных критериев, например, таких как наиболее доступные тарифы для населения, наибольшие прибыли в энергетике, минимизации затрат на приобретаемое топливо и др.

В таком случае возможно построение целевой функции, которую можно минимизировать или максимизировать.

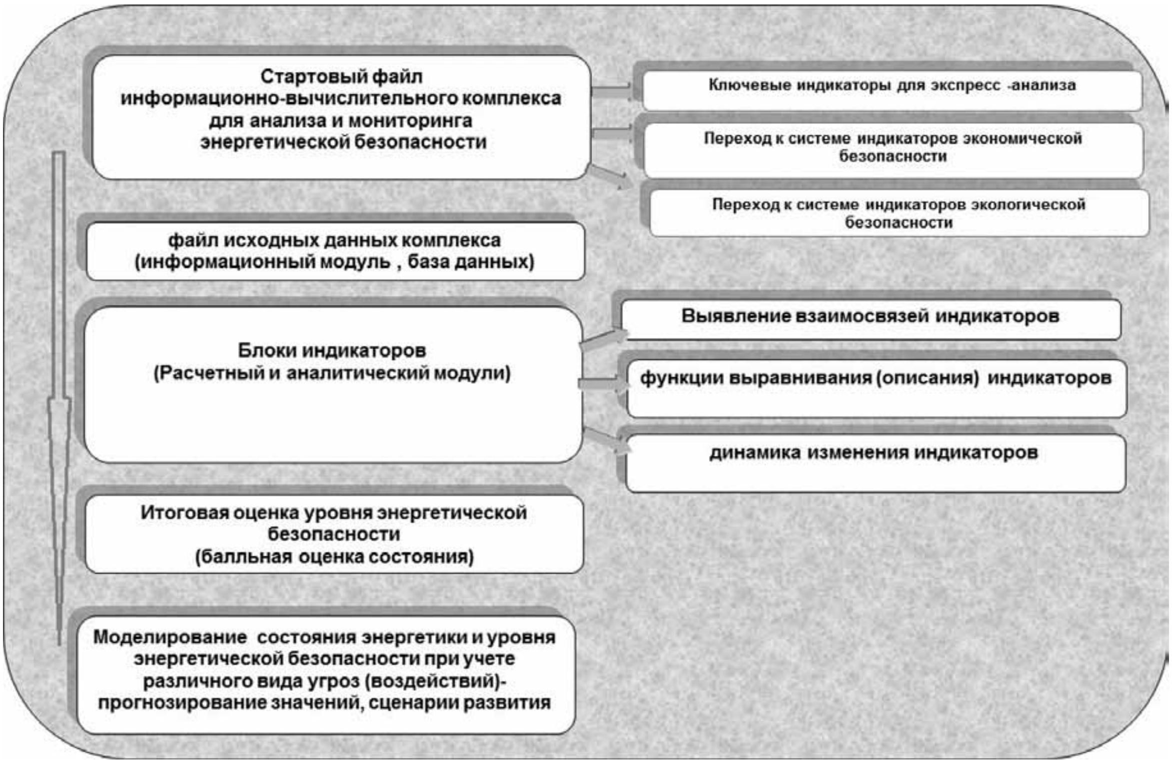

Рис. 1. *Структура вычислительного комплекса для анализа и мониторинга энергетической безопасности*

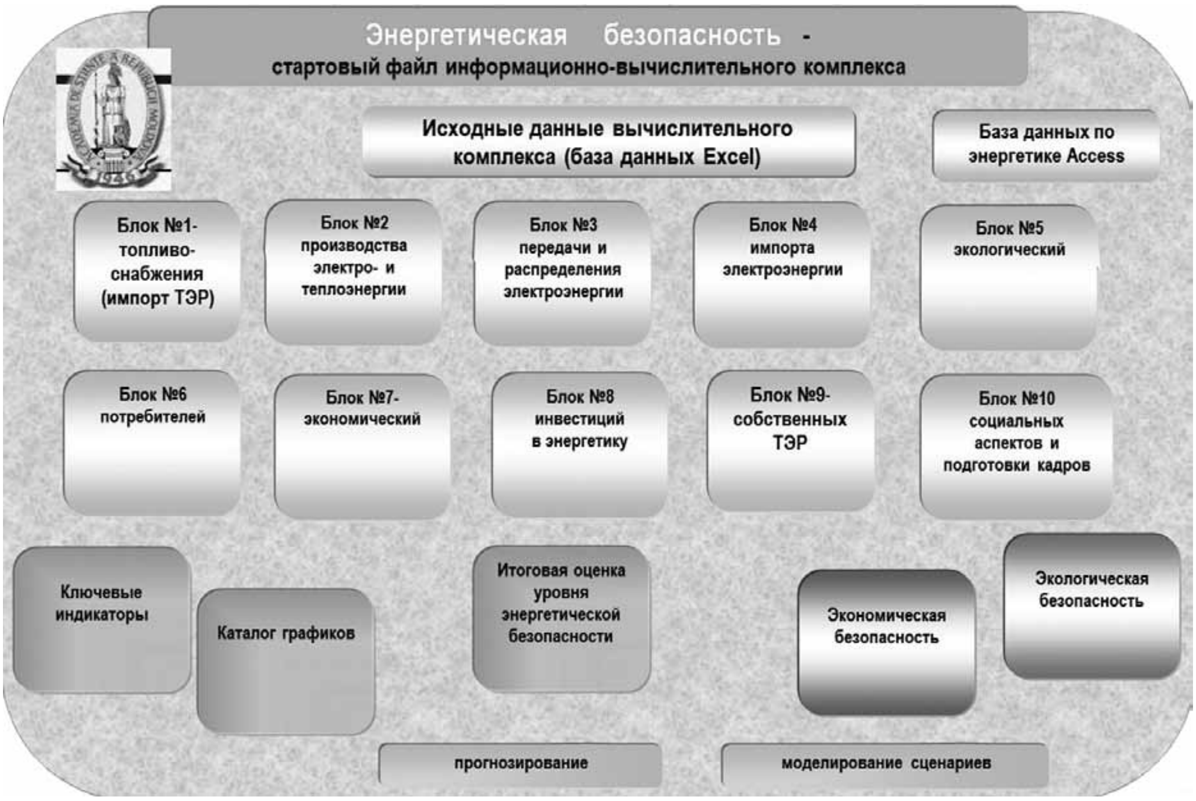

Рис. 2. *Стартовая страница вычислительного комплекса*

Для этих целей в математике имеется аппарат линейного, нелинейного, динамического, стохастического программирования.

В настоящей работе приведено описание разработанного метода условного нелинейного математического программирования, необходимого для решения ряда задач энергетики и, в частности, задачи прогноза индикаторов безопасности. Далее приведен пример его использования и реализация этого метода в приложении «Прогноз».

Специальный метод решения задач условного нелинейного математического программирования

В области энергетики есть широкий класс экстремальных задач, таких как задачи прогноза, задачи оптимизация стационарных режимов работы энергетических систем, исследования их экстремальных состояний, анализа режимов работы различных генераторов энергии и многих других, решение которых необходимо при рассмотрении вопроса энергетической безопасности. Для этих задач характерна большая или очень большая система ограничений типа равенства и неравенства. Из-за нелинейности этих ограничений задача может быть многоэкстремальной даже при выпуклой целевой функции. В таком случае уже исходная точка оптимизации должна лежать в области искомого оптимума. Если же такая точка неизвестна, приходится искать способ применения метода глобального поиска с возможностью ограниченного перебора, такого как динамическое программирование, что не всегда удается, и не только из-за невозможности существенного упрощения задачи, но и по существу. К счастью, в большинстве реальных задач можно найти исходную точку, от которой оптимальное решение по техническим причинам не может быть далеко. Тогда, если эти задачи не целочисленные, их можно решать методами условного нелинейного математического программирования, но среди этих методов нет ни одного, способного эффективно решать любые задачи.

Разработанный алгоритм основан на существенной переработке метода, описанного в работе [5]. Он предназначен для решения задач с большой или очень большой системой из числа m нелинейных уравнений с сильно разреженной матрицей Якоби и с выпуклой или хотя бы унимодальной целевой функцией. Число неизвестных переменных n ненамного превышает число m, а в целевую функцию часто входит только небольшая часть переменных. Входящие в задачу в общем случае нелинейные выражения, являющиеся ограничениями типа неравенства, преобразуются в равенства. Возникающие при этом ограниченные дополнительные переменные, как и ограниченные основные, учитываются штрафами. Сумма штрафов образует выпуклую штрафную функцию, добавляемую к целевой функции.

Метод решения общей задачи оптимизации при нелинейных ограничениях основан на разработанном методе нахождения условного оптимума (минимума) квадратичной целевой функции в пространстве решений системы линейных уравнений. В идеале при абсолютной точности вычислений он является одношаговым методом квадратичного программирования без ограничений типа неравенства. Вычислительные ошибки, конечно, делают его итерационным. Этот одношаговый метод основан на следующих трех свойствах квадратичной целевой функции, поверхности уровня которой являются эллипсоидами:

1. Направление вектора разности градиентов целевой функции, вычисленных в двух точках, зависит только от направления прямой, на которой лежат эти точки, и не зависит ни от расположения прямой, ни от расположения точек на ней.
2. На произвольно выбранной прямой в любых двух ее точках вычисляются градиенты целевой функции и находится точка минимума этой функции. Тогда плоскость, проведенная через эту точку минимума при нормали, равной разности градиентов, пройдет через минимум всей целевой функции (через центр эллипсоидов ее поверхностей уровня).
3. Плоскость, проведенная по пункту 2, будет проходить через центр (условный минимум) эллипсоида, полученного сечением поверхности уровня целевой функции любой плоскостью, если только прямая, использованная для определения проведенной плоскости по пункту 2, лежит на этой секущей плоскости.

Доказательства этих свойств несложны.

В основе алгоритма одношагового метода квадратичного программирования лежит решение системы линейных уравнений методом Гаусса. Алгоритм состоит из двух частей. В первой части строятся обе матрицы Гаусса. Верхняя треугольная матрица U, возникающая в процессе исключения из уравнений членов с диагональными переменными, и нижняя треугольная матрица L, в которой записаны действия, производившиеся над свободными элементами правого столбца. Если надо, здесь U и L используются для решения системы уравнений, в результате чего рабочая точка X (вектор из числа n переменных) оказывается на линейной поверхности a_0 пересечения m плоскостей линейных ограничений. Во второй части $n - m$ раз выполняются действия по пунктам 2 и 3. С помощью матрицы U определяется произвольная прямая, лежащая на поверхности a_0, и одномерным спуском по этой прямой точка X перемещается в минимум целевой функции. Далее строится нормаль плоскости, проходящей, согласно 3, через условный минимум задачи, лежащий на поверхности a_0. Эта операция дает новую плоскость, проходящую через перемещенную точку X. Уравнение этой плоскости включается в матрицу U (матрица L здесь не нужна), которая теперь определяет поверхность a_1, а число незаполненных строк матрицы U сокращается на единицу. Таким же образом последовательно строятся поверхности a_k, пока k не будет равно $n - m$, а матрица U — полностью заполненной. Точка пересечения всех n плоскостей, включая и плоскости m равенств, является решением задачи — точкой условного минимума X^*. Это следует из того, что по пункту (3) все $n - m$ построенных плоскостей содержат условный минимум. Но поскольку он только один (линейные ограничения, выпуклая функция), его точка будет общей точкой для всех плоскостей, то есть их пересечением X^*. Этим выполнение алгоритма заканчивается. По существу этот метод является квазиньютоновским методом второго порядка, использующим некоторое приближение вторых производных (разность градиентов во второй части решения). Его можно назвать гаусс-квазиньютоновским.

При решении любых более сложных оптимизационных задач процесс становится принципиально многоитерационным. Преобразование исходной задачи к виду, на который рассчитан общий метод условного нелинейного математического программирования, приведен в начале. Таким образом, решается задача оптимизации (минимизации) унимодальной целевой функции при ограничениях типа нелинейных равенств. На каждой итерации в исходной точке X_0 проводится линеаризация нелинейного уравнения и выполняется алгоритм одношагового квадратичного программирования. Естественно, найденное решение X в силу унимодальности целевой функции не является точкой минимума на линеаризованной системе равенств, и она не лежит на нелинейной поверхности ограничений. Поэтому производится возврат точки X на нелинейную поверхность в такую исходную точку X_0 следующей итерации, в которой целевая функция уменьшится. Для возврата на нелинейную поверхность целесообразно иметь возможность использовать вычисленные в начале итерации матрицы U и L. Для этого надо, чтобы новая точка X_0 оказалась на близком расстоянии от исходной точки X_0. Процессы возврата могут применяться самые разные, эффективные для одних задач и неэффективные для других. Все зависит от кривизны поверхности решения равенств и «качества» целевой функции — возможно меньшей ее вытянутости («овражности»), выпуклости или только унимодальности. Особый случай — это линейная целевая функция.

Метод был реализован на языке программирования VBA, входящем в систему Microsoft Office 2003, и показал удовлетворительные результаты.

Задача прогнозирования

В энергетике характерны суточные и сезонные колебания основных показателей, особенно выработки (потребления) энергии. Но при рассмотрении безопасности используются среднегодовые стратегические показатели. Их существенные колебания могут происходить или в результате больших ошибок при сборе статистической информации, или в периоды качественных изменений при крайне нестабильной экономике. Такие периоды или исключаются при прогнозировании, или берется обобщенное среднее, так что прогнозная линия должна быть плавной, отражающей обобщенную тенденцию. Это дает основание предполагать, что ее можно экстраполировать для прогноза. Широко распространенные методы прогноза [1, 6] прежде всего предназначены для тактических задач рынка, и вряд ли непосредственно применимы в задаче прогноза безопасности в энергетике, но сам вид формул и их представление конечноразностной схемой, рекуррентными формулами можно взять за основу.

Прогнозируемая функция $x(t)$ задается в виде временного ряда равноотстоящих точек с порядковыми номерами t в количестве K:

$$x(t),\ t = 1, 2, 3, ..., K. \quad (1)$$

Этому ряду точек соответствует ряд лет. Для расчета прогноза надо выбрать такой включающий последнюю точку $x(K)$ участок, который позволит предполагать правомерность прогноза. Если требуется достоверный краткосрочный прогноз, надо выбрать стационарный участок без существенных отклонений от плавного хода, для которого можно предположить качественную однородность реального процесса. Прогнозирующая функция должна укладываться в коридор возможных ошибок $x(t)$ (интервальный подход [8]). Если нужен долгосрочный прогноз общей тенденции, участок надо расширить и не предъявлять к качеству аппроксимации высоких требований.

Искомая прогнозирующая функция обозначается как

$$y(t),\ t = 1, 2, 3, ..., K, \ldots, M. \quad (2)$$

Она определена на тех же равноотстоящих точках t, что и $x(t)$, и в области прогноза занимает $M - K$ точек.

Для прогноза используются функции, записанные в виде системы конеченоразностных уравнений

$$y(t) = v(t) + z(t),\ t = 1, 2, 3, \ldots, M, \quad (3)$$
$$v(t + 1) = v(t) + a,\ t = 1, 2, 3, \ldots, M - 1, \quad (4)$$
$$z(t + 1) = z(t)u(t),\ t = 1, 2, 3, \ldots, M - 1, \quad (5)$$
$$u(t + 1) = u(t) + b,\ t = 1, 2, 3, \ldots, M - 1. \quad (6)$$

Прогноз $y(t)$ задан суммой (3) двух функций (4) и (5). Функция (4) является линейной. Функция (5) задана рекуррентной формулой геометрической прогрессии с переменным коэффициентом $u(t)$, заданным в форме линейной функции (6). Неизвестными величинами, определяющими прогноз, являются коэффициенты a и b в формулах (4) и (6) и начальные значения $v(1)$, $z(1)$ и $u(1)$ в формулах (4), (5) и (6).

Важную роль при определении прогноза играют ограничения. Экспертом, решающим задачу, в области прогноза задается ограничение

$$y_{\min} \le y(t) \le y_{\max},\ t = K + 1, \ldots, M. \quad (7)$$

Функция $u(t)$ определят переменную скорость (процент) роста или падения прогнозирующей функции. Эта скорость не может не быть ограниченной. Поэтому задается условие

$$u_{\min} \le u(t) \le u_{\max},\ t = 1, 2, 3, ..., M. \quad (8)$$

Ограничиваются также начальные значения $z(1)$ и $v(1)$.

Предполагается, что все функции $x(t)$, по которым будут производиться прогнозы, будут положительными, но диапазоны их изменения будут очень сильно отличаться друг от друга. Поэтому они масштабируются так, чтобы их значения лежали в пределах от 0 до 1. Это необходимо при организации единого вычислительного процесса во всех разнообразных задачах. Пользователь этого не заметит.

Целевая функция задачи расчета прогноза задается выражением

$$F = \sum_{T=1}^{K} (x(t) - y(t))^2\, w(t), \quad (9)$$

где $w(t)$ — заданные пользователем веса точек $x(t)$, используемых при расчете прогноза.

Расчет прогноза состоит в минимизации значения F при выполнении системы конечноразностных равенств (3)–(6), определяющих функцию прогноза $y(t)$, и всех ограничений, особенно (7) и (8). Эта экстремальная задача решается методом условного нелинейного математического программирования, описанного выше.

Задача прогнозирования является вероятностной. Обычно принято вычислять числовые характеристики значений функции $y(t)$ как случайных величин. Если случайные значения $x(t)$ подчиняются нормальному закону распределения вероятности и аппроксимирующие функции линейны относительно их неизвестных коэффициентов, то тогда эти характеристики можно вычислить. Но в нашем случае нет оснований предполагать нормальность закона распределения, а функция $z(t)$ (5) не линейна. Поэтому числовые характеристики определяются стохастическим численным экспериментом. По заданному равномерному или нормальному закону распределения вероятностей значения $x(t)$ варьируются во всех точках и вычисляются прогнозы. По всему множеству опытов определяются статистические характеристики: математическое ожидание $y(t)$ и размах $\inf y(t)$ и $\sup y(t)$. Можно определить и другие необходимые характеристики. Возможности современных персональных компьютеров позволяют проводить достаточно объемный численный эксперимент. Этим снимаются вопросы, связанные с возможной ненормальностью распределений вероятности, нелинейностью регрессионных моделей и так далее.

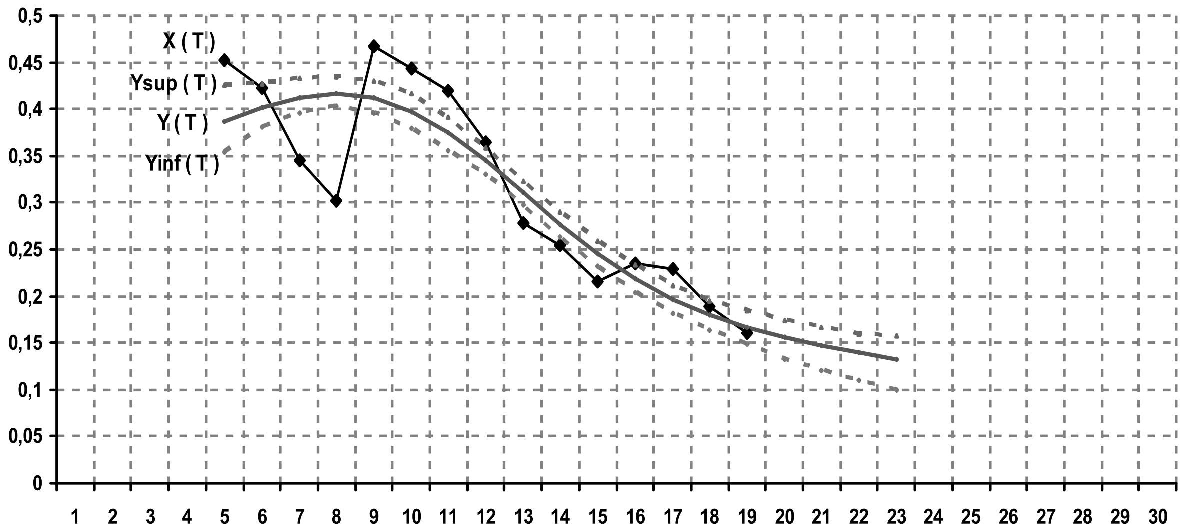

Рис. 3. *Пример расчета прогноза по индикатору «Доля среднедушевого дохода на приобретение ТЭР в месяц» для интервала с 1994 по 2011 гг.*

На графике рисунка 3 приведен пример расчета прогноза по индикатору «Доля среднедушевого дохода на приобретение ТЭР в месяц» для интервала с 1994 по 2011 гг. Величина ошибки $x(t)$ составляет (максимум) 0,05. Проведено 100 опытов численного стохастического эксперимента при равномерном законе распределении вероятности. На графике точки линии $x(t)$ отмечены ромбами. Сплошная линия — математическое ожидание $y(t)$. Прерывистыми линиями отмечен размах колебаний $\inf y(t) \leftrightarrow \sup y(t)$.

Для решения задач прогноза индикаторов безопасности было создано приложение «Прогноз 2». Прогнозирование производится в интерактивном режиме, при котором эксперт может выбрать некоторые параметры. Благодаря этому он может подобрать удовлетворительный вариант прогноза. Необходимая для работы в интерактивном режиме форма, позволяющая вводить данные, производить эксперименты по построению прогноза, запоминанию и повторному просмотру всех результатов, в разработанном приложении «Прогноз 2» находится на одном листе программы Excel. Программа разработанного приложения, написанная на языке VBA, находится в модулях той же книги, содержащей все приложение. Объем xls-файла меньше одного мегабайта.

В постановке задачи присутствует нелинейное уравнение $z(t)$ (5), что может вызвать многоэкстремальность задачи. Упомянутые выше ограничения могут локализовать поиск экстремума в нужной области. Формулировка задачи в виде конечноразностной схемы позволяет решать ее другими, переборными методами, преодолевающими многоэкстремальнось.

Задачу прогноза следует рассматривать в рамках общей задачи поиска управления, хотя в силу многих причин (недостаточная изученность, отсутствие необходимых статистических данных, огромный объем задачи и так далее) пока она решается в ограниченном объеме. Одним из методов, предназначенным для поиска оптимального управления, является динамическое программирование, поэтому было бы целесообразно применить его и в задачах прогноза значений индикаторов энергетической безопасности. Такие разработки сейчас ведутся в Институте энергетики Академии наук Молдавии.

Список источников

1. Аналитические технологии для прогнозирования и анализа данных 1999–2005 // НейроПроект. [Электронный ресурс]. URL: http://www.neuroproject.ru/forecasting_tutorial.php

2. Быкова Е. В. Методы расчета и анализ показателей энергетической безопасности. — Кишинев, 2005. — 156 с. — (Энергетическая безопасность).

3. Быкова Е. В. Мониторинг индикаторов энергетической безопасности. — Кишинев : Типографи АНМ, 2008. — 162 с. — (Энергетическая безопасность).

4. Влияние энергетического фактора на экономическую безопасность регионов России / Благодатских В. Г., Богатырев Л. Л., Бушуев В. В., Воропай Н. И. и др. — Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 1998. — 195 с.

5. Гродецкий М. В. Прикладной метод условного нелинейного программирования. — Кишинев, 1996. — 11 с. (Труды Института энергетики Академии наук Республики Молдова).

6. Карпунова С. Ю. Преимущества модели ARIMA для краткосрочного прогнозирования поведения ценовых графиков Forex. [Электронный ресурс]. URL: http://www.mastersdonntu.edu.ua/2007/fvti/karpunova/diss/index.html

7. Методические подходы к решению проблемы энергетической безопасности Молдовы и Беларуси / Быкова Е. В., Михалевич А. А., Постолатий В. М.,Фисенко С. П., Шнип А. И., Римко Д. В., Гродецкий М. В. — Кишинев, 2010. — 100 с. (Энергетическая безопасность).

8. Орлов А. И. Эконометрика : учебник. — М.: Экзамен, 2002. — 576 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.aup.ru/books/m153

Информация об авторах

Быкова Елена Витальевна (Кишинев) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института энергетики Академии наук Молдовы (2028, Молдова, г. Кишинев, ул. Академическая, 5, e-mail: elena-bicova@rambler.ru).

Гродецкий Михаил Викторович (Кишинев) — научный сотрудник Института энергетики Академии наук Молдовы (2028, Молдова, г. Кишинев, ул. Академическая, 5, e-mail: elena-bicova@rambler.ru).

E. V. Bykova
Ph.D. in Technical Sciences
Institute of Energetics, the Moldavian Academy of Sciences
M. V. Grodetskiy
Institute of Energetics, the Moldavian Academy of Sciences

Analysis and monitoring of energy security and prediction of indicator values using conventional non-linear mathematical programming

The brief description of the structure of computing system for monitoring and analysis of energy security is shown. The module for prognoses the values of the indicators and methods developed for it is described.

Keywords: energy security, monitoring, projection

References

1. Analiticheskie tekhnologii dlya prognozirovaniya i analiza dannykh 1999–2005 [Analytical techniques for prediction and data analysis 1999-2005]. NeuroProject. Retrieved from: http://www.neuroproject.ru/forecasting_tutorial.php

2. Bykova E. V. (2005). Metody rascheta i analiz pokazateley energeticheskoy bezopasnosti [Methods of calculation and analysis of energy security]. Kishinev: Energy Security.

3. Bykova E. V. (2008). Monitoring indikatorov energeticheskoy bezopasnosti [Monitoring indicators of energy security]. Kishinev: Energy Security, ANM.

4. Blagodatskikh V. G., Bogatyrev L. L., Bushuev V. V., Voropay N. I. (1998). Vliyanie energeticheskogo faktora na ekonomicheskuyu bezopasnost' regionov Rossii [The influence of the energy factor on the economic security of Russia's regions]. Ekaterinburg: Ural State University Publishing House.

5. Grodetskiy M. V. (1996). Prikladnoy metod uslovnogo nelineynogo programmirovaniya [Applied method of conventional non-linear mathematical programming]. Trudy Instituta energetiki Akademii nauk Respubliki Moldova. Kishinev.

6. Karpunova S. Yu. (2007). Preimushchestva modeli ARIMA dlya kratkosrochnogo prognozirovaniya povedeniya tsenovykh grafikov Forex [Benefits of an ARIMA model to predict the behavior of Forex short-term price charts]. Retrieved from http://www.mastersdonntu.edu.ua/2007/fvti/karpunova/diss/index.html

7. Bykova E. V., Mikhalevich A. A., Postolatiy V. M.,Fisenko S. P., Shnip A. I., Rimko D. V., Grodetskiy M. V. (2010). Metodicheskie podkhody k resheniyu problemy energeticheskoy bezopasnosti Moldovy i Belarusi [Methodological approaches to solving the energy security problem in Moldova and Belarus]. Kishinev: Energy Security.

8. Orlov A. I. (2002). Ekonometrika: uchebnik [Econometrics: a textbook]. Moscow: Examen. Retrieved from http://www.aup.ru/books/m153

Information about the authors

Bykova Elena Vital'evna (Kishinev) — Ph.D. in Technical Sciences, leading research scientist at the Institute of Energetics, the Moldavian Academy of Sciences (2028, the Republic of Moldova, Kishinev, Akademicheskaya St. 5, e-mail: elena-bicova@rambler.ru).

Grodetskiy Mikhail Viktorovich (Kishinev) — research scientist at the Institute of Energetics, the Moldavian Academy of Sciences (2028, the Republic of Moldova, Kishinev, Akademicheskaya St. 5, e-mail: elena-bicova@rambler.ru).