

УДК 004.942+338.27

*В статті запропонована технологія налаштування імітаційної моделі регіональної макроекономічної системи. У рамках запропонованої технології розроблені методика побудови функцій, що відбивають причинно-наслідкові зв'язки в моделі, методика визначення істотних настроювальних параметрів моделі та методика оцінки адекватності моделі*

*Ключові слова: імітаційна модель, прогнозування, макроекономічна система, налаштування моделі, адекватність моделі*

*В статье предложена технология настройки имитационной модели региональной макроекономической системы. В рамках предложенной технологии разработаны методика построения функций, отражающих причинно-следственные связи в модели, методика определения существенных настроечных параметров модели и методика оценки адекватности модели*

*Ключевые слова: имитационная модель, прогнозирование, макроекономическая система, настройка модели, адекватность модели*

# ТЕХНОЛОГИЯ НАСТРОЙКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**М. А. Гринченко**

Кандидат технических наук, старший преподаватель\*

Контактный тел.: (057) 707-68-24

E-mail: mgrinchenko@list.ru

**И. И. Бабич**

Аспирант\*

Контактный тел.: 095-686-05-10

E-mail: babich.igor.i@gmail.com

\*Кафедра стратегического управления

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»

ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

## 1. Введение. Постановка задачи

Важным аспектом в имитационном моделировании является проверка адекватности модели, требующая применения определенной методики. В процессе создания модели из-за идеализации внешних условий и режимов функционирования, исключения части параметров, пренебрежения некоторыми случайными факторами, искажается представление исследуемого процесса или явления. Отсутствие точных сведений о внешних воздействиях, определенных нюансах структуры системы, используемые в модели аппроксимации, интерполяции, предположения и гипотезы приводят к увеличению несоответствия между моделью и исследуемой системой. В результате полученная модель может существенно отличаться от реальной системы.

Оценка адекватности региональной макроекономической модели имеет два аспекта: уверенность в том, что модель ведет себя, как и региональная система; установление того, что выводы, полученные в результате экспериментов с моделью, справедливы и корректны. Оба эти аспекта в совокупности сводятся к обычной задаче нахождения равновесия между стоимостью каждого действия, связанного с оценкой адекватности модели, ценностью получаемой информации и последствиями ошибочных заключений.

В работах [1-4] рассматриваются вопросы долгосрочного прогнозирования процессов развития региональной макроекономической системы (РМЭС). Как

предложено в работе [3], для осуществления вариантного прогнозирования процессов развития РМЭС осуществляется: настройка имитационной модели РМЭС, прогнозирование перспективного развития РМЭС и прогнозирование последствий государственного управления.

На основе принципов настройки имитационной модели [5] в данной работе рассматривается разработка технологии настройки имитационной модели процессов развития (ИМПР) на реальную РМЭС.

## 2. Основные этапы настройки

Для настройки модели используется ретроспективная информация о процессах развития РМЭС. При выборе настроенного интервала  $[0, T_1]$ , используемого для настройки модели на РМЭС, необходимо учитывать следующие ограничения:

1) наличие достаточного количества статистических данных в официальных источниках;

2) РМЭС должна находиться в стабильном состоянии на протяжении настроечного интервала, т.е. не должно быть резких скачков значений основных макроекономических показателей;

3) должна быть достаточная величина периода упреждения прогноза (более 10 лет).

Для выбранного настроечного интервала  $[0, T_1]$  необходимо задать значения параметров и переменных модели [6]. Следующим этапом настройки является

ся задание функций, которые определяют численные значения  $q_i(x_j(t_k))$  для каждого  $t_k$  и выражают основные тенденции в РМЭС. При выборе начального приближения этих функций для рассматриваемой РМЭС можно использовать их аналоги для мировой МЭС [7].

Учитывая, что, используя статистические данные можно получить ограниченное количество значений  $x_j(t_k)$ , предлагается использовать метод линейной аппроксимации.

Значения параметров функции вычисляются на основе метода наименьших квадратов.

Далее необходимо масштабировать полученные зависимости, поскольку рассматриваемый интервал моделирования процессов развития РМЭС значительно меньше интервала, рассматриваемого в мировой модели Форрестера [7].

Масштабирование функций  $q_i(x_j(t_k))$  включает следующие шаги:

1) определение узловой точки  $\tilde{x}_j$  модели Форрестера, в окрестностях которой определены табличные функции  $q_i(x_j(t_k))$  для рассматриваемой РМЭС;

2) восстановление в узловых точках функций Форрестера путем смещения их по оси ординат до совмещения значений в узловой точке  $\tilde{x}_j$  (предполагается, что тенденция, задаваемая функцией в мировой модели будет сохраняться для рассматриваемой РМЭС);

3) формирование кусочно-линейных функций на основе восстанавливаемых значений в узловых точках табличных функций  $q_i(x_j(t_k))$ ;

4) установление интервалов восстановления табличных функций  $q_i(x_j(t_k))$ .

Если для рассматриваемых функций  $q_i(x_j(t_k))$  нет аналогов в модели Форрестера, то их значения восстанавливаются экспертным путем. Для этого осуществляется качественный анализ процесса, реализуемого данной связью. Как правило, в основе анализа лежат исследования вероятного поведения параметров в экстремальных условиях. Таким образом, функции  $q_i(x_j(t_k))$  являются экспертными характеристиками процессов, лежащих в основе моделируемой реальной связи РМЭС.

Следующим этапом технологии настройки ИМПР РМЭС [5, 6] является задание начальных значений настроечных параметров. Следует отметить, что значения настроечных параметров могут быть не равны в точности статистическим показателям, т.к. они отражают номинальный режим функционирования РМЭС.

Настроечные параметры подразделяются на три группы. К первой группе относятся параметры, значения которых приравниваются к соответствующим значениям параметров мировой модели Форрестера. Вторая группа параметров определяется на основе статистической информации о рассматриваемой РМЭС [6]. К третьей группе относятся параметры, которые связаны с особенностями предлагаемой в ИМПР РМЭС. Значения настроечных параметров третьей группы задаются экспертным путем.

Таким образом, после формирования начальных значений параметров и переменных ИМПР РМЭС осуществляется пробный прогноз на проверочном периоде  $[T_1, T_2]$  по алгоритму, описанному в [6].

Предполагается, что весь рассматриваемый период  $[0, T]$  делится на настроечный подпериод  $[0, T_1]$ , проверочный –  $[T_1, T_2]$  и прогнозный –  $[T_2, T]$  и разбивается на  $V = \frac{T}{h}$ ,  $V_1 = \frac{T_1}{h}$ ,  $V_2 = \frac{T_2 - T_1}{h}$ ,  $V_3 = \frac{T - T_2}{h}$  равных интервалов, где  $h$  – величина шага дискретизации. Каждому шагу соответствует временной интервал  $[t_k, t_{k+1}]$ , где  $t_k = h \cdot k$ ,  $k = 0, \dots, V-1$ .

Адекватность модели оценивается на основе коэффициентов Тейла и Джини [6, 8].

Расчет коэффициента Тейла для модели в целом, и для каждой переменной производится по формулам:

$$H = \frac{\sqrt{\sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^n(t_k) - \tilde{Y}_l^\phi(t_k))^2}}{\sqrt{\sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^n(t_k))^2} + \sqrt{\sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^\phi(t_k))^2}}, \quad (1)$$

$$H_l = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^n(t_k) - \tilde{Y}_l^\phi(t_k))^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^n(t_k))^2} + \sqrt{\sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^\phi(t_k))^2}}, \quad l = \overline{1, M}, \quad (2)$$

$$\text{где } \tilde{Y}_l^n(t_k) = \frac{Y_l^n(t_k)}{\max\{Y_l^\phi(t_k), Y_l^n(t_k)\}},$$

$$\tilde{Y}_l^\phi(t_k) = \frac{Y_l^\phi(t_k)}{\max\{Y_l^\phi(t_k), Y_l^n(t_k)\}},$$

$H$  – коэффициент Тейла для модели в целом,  $H_l$  – коэффициент Тейла для  $l$ -ой переменной первого типа РМЭС,  $Y_l^n(t_k)$  – прогнозное значение  $l$ -ой переменной первого типа на проверочном интервале,  $Y_l^\phi(t_k)$  – фактическое значение  $l$ -ой переменной,  $\tilde{Y}_l^n(t_k)$  – нормированное прогнозное значение  $l$ -ой переменной на проверочном интервале,  $\tilde{Y}_l^\phi(t_k)$  – нормированное фактическое значение  $l$ -ой переменной, на проверочном периоде  $[0, T_2]$ .

Коэффициенты расхождения Тейла (1) и (2) могут быть использованы при сопоставлении прогнозов, получаемых на основе различных методов и моделей. Допустимая ошибка прогнозов задается экспертами и, как правило, составляет 5-10%.

Оценка адекватности также осуществляется на основе коэффициента Джини, который называют индексом концентрации и вычисляется по формулам:

$$G = \frac{\sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^{V_1+V_2} |\tilde{Y}_l^n(t_k) - \tilde{Y}_l^\phi(t_k)|}{2(V_1 + V_2)^2 z},$$

$$G_l = \frac{\sum_{k=1}^{V_1+V_2} |\tilde{Y}_l^n(t_k) - \tilde{Y}_l^\phi(t_k)|}{2(V_1 + V_2)^2 z_l}, \quad (3)$$

$$\text{где } z = \frac{\sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^n(t_k) + \tilde{Y}_l^\phi(t_k))}{2M(V_1 + V_2)},$$

$$z_l = \frac{\sum_{k=1}^{V_1+V_2} (\tilde{Y}_l^n(t_k) + \tilde{Y}_l^\phi(t_k))}{2(V_1 + V_2)},$$

$G$  – коэффициент Джини для всей модели,  $G_l$  – коэффициент Джини для  $l$ -ой переменной первого типа модели.

Вычисление коэффициентов (3) дает возможность более точной оценки адекватности модели. Таким образом, настройка модели заканчивается получением удовлетворительного значения ошибки прогноза по двум критериям. Если после расчета коэффициентов (1)-(3) определено, что модель неадекватна, то проводится корректировка начальных значений настроечных параметров [5].

Корректировке подвергаются только значимые настроечные параметры модели, которые определяются по следующей процедуре.

Шаг 1. Качественный анализ ошибки прогноза по всем переменным состояния

$$\{\tilde{Y}_l(t_k), l=1, M, k=\overline{V_1, V_1+V_2-1}\}$$

на основе рассчитанных значений коэффициентов Тейла и Джини (1) и (3).

Шаг 2. Для всех переменных 1-го типа, у которых значения ошибки прогноза больше допустимого значения, проводится следующая процедура. Для каждого настраиваемого параметра начиная с  $s=1$ :

2.1. Задаются изменения значения  $N_s$  ( $s=1, v$ ) на малую величину  $\Delta N_s$  (например, 5-10% от исходного значения).

2.2. Выполняется пробный прогноз рассчитываются новые значения  $\{\tilde{Y}_l(t_k), l=1, M, k=\overline{V_1, V_1+V_2-1}\}$ .

2.3. Осуществляется расчет значений коэффициентов Тейла и Джини по формулам (1)-(3).

2.4. Определяется значимость параметра  $N_s$ , которая заключается в следующем. Если изменение настроечного параметра  $N_s$  влияет на уровень  $Y_l(t_k)$ , то принимается  $\alpha'_{sl}=1$ , если изменение настроечного параметра  $N_s$  не оказывает существенного влияния на уровень  $Y_l(t_k)$ , то  $\alpha'_{sl}=0$ .

2.5. Выполняется переход к следующему настроечному параметру ( $s=s+1$ ), повторяется выполнение п. 2.1-2.4 до тех пор пока  $s \leq v$ .

Шаг 3. Анализ результатов определения существенных настроечных параметров ИМПР РМЭС.

3.1. Выбрать  $N_s$  для которых  $\alpha'_{sl}=1$  как для каждой  $l$ -ой переменной первого типа ИМПР РМЭС, так и для

модели в целом, и выполнить ранжирование настроечных параметров по величине ошибки прогноза  $\sigma_1$ .

3.2. Наиболее значимому настроечному параметру  $N_s$  для переменной  $Y_l$  (с наибольшей величиной ошибки прогноза  $\sigma_1$ ) приписывается ранг  $R_{sl}=1$ , менее значимому 2 и т.д.

Шаг 4. Определение множества существенных настроечных параметров  $\Omega$ , изменение которых сильно влияет на переходные процессы и модель в целом. К множеству существенных настроечных параметров  $\Omega$  относятся настроечные параметры, для которых  $R_{sl}=1$  ( $s=1, v, l=1, M$ ), а также те которые являются значимыми по отношению к двум и более переменным 1-го типа и модели в целом, т.е. для них должно выполняться условие  $\sum_{l=1}^M \alpha'_{sl} \geq 2$ .

После определения множества  $\Omega$ , производится корректировка настроечных параметров, осуществляется следующий пробный прогноз, расчет переменных первого типа  $Y_l(t_k)$  ИМПР РМЭС и проверка (1)-(3).

Применение данной методики позволяет получить адекватную имитационную модель РМЭС, которую можно использовать для прогнозирования процессов её развития [2, 6, 9].

### 3. Анализ полученных результатов и выводы

На основе данных по Харьковской области была осуществлена настройка ИМПР РМЭС с 2000 года. Для настройки модели используется статистика за 2000-2006 гг.

После этого осуществляется пробное прогнозирование на проверочном периоде и проводится проверка адекватности модели. На проверочном периоде с 2007-2010 гг. был проведен прогноз и сравнительный анализ полученных результатов.

Для оценки качества прогноза проведен расчет значений коэффициентов Тейла и Джини, которые для периода 2007-2010 гг. составляют 0,034 и 0,023 соответственно, что свидетельствует о достоверности результатов моделирования полученных с помощью разработанной прикладной информационной технологии.

Таким образом, технология настройки модели процессов развития РМЭС обеспечивает достоверность результатов полученных при моделировании и варианном прогнозировании процессов развития РМЭС.

Полученные результаты работы направлены на повышение эффективности работы органов государственной власти и могут быть использованы для обоснования и оценки последствий принимаемых решений.

### Литература

1. Гринченко, М.А. Долгосрочное прогнозирование динамики развития территориальных систем с переходной экономикой нового типа [Текст] / В.Л. Лисицкий, М.А. Гринченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПИ», 2005. – № 19. – С. 37-40.
2. Гринченко, М.А. Разработка системы поддержки принятия решений для прогнозирования развития макроэкономической системы [Текст] / М.А. Гринченко // Вісник Херсонського Національного технічного університету. – Херсон: «Олди-плюс», 2007. – №4 (27). – С.137-142.

3. Гринченко, М.А. Технология прогнозирования процессов развития макроэкономических систем в условиях государственных механизмов регулирования [Текст] / М.А. Гринченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №1/7 (49). – с. 24-26.
4. Гринченко, М.А. Прогнозирование процессов развития региональной макроэкономической системы в условиях государственного регулирования [Текст] / М.А. Гринченко // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» (SAIT 2011). – Київ. – 2011 – С. 228-229.
5. Гринченко, М.А. Методика настройки имитационной модели для прогнозирования развития макроэкономических систем [Текст] / М.А. Гринченко // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Системний аналіз і управління». – Запоріжжя. – 2006.– С. 25-27.
6. Гринченко, М.А. Разработка имитационной модели прогнозирования процессов развития макроэкономических систем / В.Л. Лисицкий, М.А. Гринченко [Текст] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – №3/5 (39). – С. 4-8.
7. Форрестер, Дж. Мировая динамика: [пер. с англ.] [Текст] / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1979. – 179 с.
8. Гринченко, М.А. Применение подсистемы моделирования развития макроэкономических систем в процессе управления проектами развития региона / М.А. Гринченко // Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Управління проектами у розвитку суспільства. Управління проектами в умовах глобалізації знань». – Київ. – 2006. – С. 43-45.
9. Гринченко, М.А. Реализация информационной технологии прогнозирования процессов развития макроэкономической системы. Результаты исследования [Текст] / М.А. Гринченко // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2011. – № 2(92). – С. 259-263.

### **Abstract**

*The task of the adjustment technology development on the real regional macroeconomic system for the simulation model, that is a modification of the world dynamics model, is considered in this paper. System dynamics methodology, the theory of experimental design, mathematical analysis and simulation are used to solve the problem. For the first time the adjustment technology of system dynamics simulation model on a real regional macroeconomic system was developed. This adjustment technology includes the following stages: construction of logic functions that reflect the causal relationships in the model, evaluation and correction of significant model parameters, evaluation of the model adequacy. For evaluation the adequacy of the model it is proposed to use the Gini and Theil coefficients. The usage of adjustment technology developed by the authors allows getting an adequate simulation model of regional macroeconomic system that can be used to forecast the processes of its development. This technology has been used to predict the development processes of Kharkov region. The estimated values for Gini and Theil coefficients for the period 2007-2010 equal to 0.034 and 0.023, respectively, indicating the reliability of simulation results and efficiency of the adjustment technology*

**Keywords:** *simulation model, forecasting, macroeconomic system, model adjustment, model adequacy*