МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Д. В. Гирдюк
магистрант факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

В. П. Пересада
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ЗАО «Инфоресурс» (Санкт-Петербург)

Н. В. Смирнов
докт. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой моделирования экономических систем факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

Т. Е. Смирнова
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры моделирования социально-экономических систем факультета прикладной математики — процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКОНОМИКЕ — СРЕДСТВО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ В ПРАКТИКЕ УПРАВЛЕНИЯ

Введение

Внедрение цифровых технологий во все сферы функционирования современного общества — это необратимая тенденция нашего времени. Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации» от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ (в ред. от 31 декабря 2017 г.) (Законодательство Российской Федерации, 2018) предписывает схемы и механизмы анализа и планирования социально-экономического развития как на федеральном, так и на региональном уровнях. Правительство Российской Федерации 28 июля 2017 г. утвердило Программу «Цифровая экономика Российской Федерации» (Правительство Российской Федерации, 2018). Эти юридические документы дают четкие ориентиры органам власти различного уровня, научному сообществу и бизнес-структурам в их проектной деятельности. Так, одним из наиболее важных направлений в Программе цифровой экономики отмечено государственное управление и развитие системы центров обработки данных.

В октябре 2017 г. в Санкт-Петербурге прошел Всероссийский форум «Система распределенных ситуационных центров как основа цифровой трансформации государственного управления» (Всероссийский форум СРСЦ, 2017). Одной из главных задач форума была разработка и внедрение научно обоснованных методов и технологий аналитической работы, прогнозирования и стратегического планирования для использования в СРСЦ в условиях цифровой трансформации государственного управления и экономики России. Вместе с тем очевидно, что подготовка управленческих решений органов исполнительной власти федерального и регионального уровней требует оценки ключевых показателей состояния экономики региона, динамики производства и потребления товаров и услуг, а также прогнозирования социально-экономических тенденций.

В мировой практике для решения этих задач широко используется модель «затраты-выпуск» (Леонтьев, 1997). Уже 30 лет функционирует международная

DOI 10.31085/1814-4802-2018-14-4-24-35

© Д. В. Гирдюк, В. П. Пересада, Н. В. Смирнов, Т. Е. Смирнова, 2018

ассоциация IIOA (International Input-Output Association, 2018), которая объединяет ученых, занимающихся теорией и практикой приложений моделей межотраслевого баланса (МОБ). Еврокомиссия в 2009–2012 гг. создала уникальный ресурс — мировую базу данных «затраты-выпуск» (World Input-Output Database (WIOD), 2018). На сайте WIOD доступны национальные таблицы «затраты-выпуск» для экономик 43 наиболее развитых стран мира. В России аналогичные статистические данные ежегодно публикуются Росстатом (Росстат, 2018). Базы данных Росстата и WIOD дают возможность любому аналитику решать задачи моделирования и прогнозирования макроэкономических тенденций. По нашему мнению, именно динамические модели МОБ должны лежать в основе алгоритмов научно обоснованного прогнозирования и стратегического планирования, применяемых в СРСЦ.

Исторически динамические модели МОБ появились в СССР на этапе проектирования первой общегосударственной автоматизированной системы учета и обработки информации (ОГАС) под руководством академика В. М. Глушкова (Глушков, 1982). Этим занималась научная школа стратегического планирования под руководством Н. И. Ведуты (Ведута, 1999). В настоящее время динамические модели МОБ представлены не только в научных монографиях, но и в учебниках (Гранберг, 1985; Величко и др., 2017; Федосеев и др., 1999).

В рамках настоящей работы предлагается рассмотреть возможности количественного (цифрового) анализа и управления макроэкономическими тенденциями региона на основе динамической модели МОБ. Причем сама предлагаемая модель МОБ является объектом методологического анализа, поэтому интерес представляют вопросы «настройки» модели под конкретную прикладную задачу цифровизации процессов подготовки управленческих решений. Коллектив авторов уже имеет некоторый опыт реализации научно-исследовательских и образовательных проектов в этом направлении аналитической работы. Результаты исследований по применению динамических балансовых моделей для прогнозирования и коррекции макроэкономических тенденций представлены в работах (Peresada et al., 2014; Волик, Смирнов, 2015; Попков, 2015; Смирнов, Смирнова, 2015; Белоусова, Попков, 2016; Пересада и др., 2017; Гирдюк, 2018).

Описание таблицы МОБ

Для удобства восприятия последующего материала приведем пример таблицы МОБ, который иллюстрирует основные величины и понятия, а также их взаимосвязи (Елисеева, Пересада, 2003; Пересада, 2010). В таблице МОБ представлены n секторов экономики, каждый из которых является производителем и одновременно потребителем определенных видов продукции или услуг остальных секторов.

Первым квадрантом общей матрицы МОБ является $n \times n$ — матрица *сферы производства Ap* с элементами p_{ij} (руб.) (см. табл. 1). Столбцы этого квадранта определяют *промежуточное потребление* каждого j-го сектора экономики как производителя, т. е. потребление продуктов других секторов для производства своего продукта. Элементы матрицы *Ap* задаются соотношением $p_{ij} = P_i a_{ij} In_j$. Они представляют собой произведение цены потребленной продукции P_i (руб./ед.$_i$) каждого i-го сектора, *технологического коэффициента* a_{ij} и объема In_j годового выпуска j-го сектора в натуральном выражении (ед.$_j$/год) (например, кубометры/год, и т. д.). Величина a_{ij} (в натуральном выражении ед.$_i$/(ед.$_j$/год)) определяет количество i-го вида продукции, необходимое для выпуска единицы j-го вида продукции в единицу времени. Технологические коэффициенты a_{ij} характеризуют совершенство

технологий, используемых в каждом секторе экономики. Диагональные элементы p_{jj} представляют собой затраты каждого сектора на собственные нужды.

Таблица 1

Совмещенные матрицы МОБ для трехпродуктовой экономики в денежном выражении $Ap\{p_{ij}\}$ (млрд) и в относительных величинах $R\{r_{ij}\}$ (год)

Производители	Потребители				Годовой выпуск
	С/хозяйство	Промышленность	Энергетика	Конечное потребление	
С/хозяйство Промеж. потребление Относит. затраты	$p_{11} = 71{,}8$ $r_{11} = 0{,}25$	$p_{12} = 57{,}7$ $r_{12} = 0{,}2$	$p_{13} = 0{,}0$ $r_{13} = 0{,}0$	$Y_1 = 157{,}8$ $Yr_1 = 0{,}325$	$I_1 = 287{,}3$
Промышленность Промеж. потребление Относит. затраты	$p_{21} = 81$ $r_{21} = 0{,}28$	$p_{22} = 34{,}8$ $r_{22} = 0{,}12$	$p_{23} = 46{,}4$ $r_{23} = 0{,}312$	$Y_2 = 128{,}2$ $Yr_2 = 0{,}264$	$I_2 = 290{,}4$
Энергетика Промеж. потребление Относит. затраты	p_{31}=54,8 $r_{31} = 0{,}19$	$p_{32} = 18{,}4$ $r_{32} = 0{,}063$	$p_{33} = 20{,}6$ $r_{33} = 0{,}138$	$Y_3 = 55$ $Yr_3 = 0{,}113$	$I_3 = 148{,}8$
Добавленная стоимость Относит. стоимость	$V_1 = 79{,}7$ $Vr_1 = 0{,}277$	$V_2 = 179{,}5$ $Vr_2 = 0{,}618$	$V_3 = 81{,}8$ $Vr_3 = 0{,}55$	$V_b = 145$ $rg = V_b/I_4 = 0{,}298$	$I_4 = ВВП = 486$
Годовой выпуск	$I_1 = 287{,}3$	$I_2 = 290{,}4$	$I_3 = 148{,}8$	$I_4 = ВВП = 486$	$I_s = 1212{,}5$
Оплата труда Оплата относительная	$W_1 = 47{,}7$ $Wr_1 = 0{,}166$	$W_2 = 108$ $Wr_2 = 0{,}372$	$W_3 = 47{,}8$ $Wr_3 = 0{,}321$	$W_b = 93{,}2$ $Wr_b = 0{,}192$	–
Прибыль Относит. прибыль	$Pr_1 = 32$ $Prr_1 = 0{,}111$	$Pr_2 = 71{,}5$ $Prr_2 = 0{,}246$	$Pr_3 = 34$ $Prr_3 = 0{,}228$	$Pr_b = 51{,}8$ $Prr_b = 0{,}107$	–
Произв. затраты Относ. себестоимость	$Pc_1 = 255{,}3$ $Rs_1 = 0{,}889$	$Pc_2 = 218{,}9$ $Rs_2 = 0{,}754$	$Pc_3 = 114{,}8$ $Rs_3 = 0{,}772$	$Pc_b = 434{,}2$ $Rs_b = 0{,}893$	–

Сумма элементов каждого столбца матрицы Ap равна стоимости промежуточного потребления Pp_j в j-м секторе. В строках матрицы Ap приводятся стоимости продукции p_{ij}, которую i-й сектор, как производитель, поставляет за год каждому j-му потребителю. Сумма элементов каждой i-й строки и конечного потребления равна стоимости объема реализованной продукции (годовым продажам) X_i этого сектора экономики.

Второй квадрант общей матрицы МОБ (см. $(n+1)$-й столбец табл. 1 представляет собой n-мерный вектор-столбец *стоимостей продукции конечного потребления* $Y = (Y_1,\ldots,Y_n)^T = (P_1Yn_1,\ldots,P_nYn_n)^T$.

Третьим квадрантом матрицы «затраты-выпуск» является $(n+1)$-я строка V. Ее элементы V_j представляют собой показатели *добавленной стоимости*. Добавленная стоимость V_j, созданная в каждом секторе производственной сферы экономики, определяется разностью между ожидаемой стоимостью годового выпуска продукции $I_j = P_jIn_j$ в j-м секторе и стоимостью его промежуточного потребления Pp_j, т. е. $V_j = I_j - Pp_j$. При этом добавленная стоимость V_j включает три составляющие: *затраты на оплату труда* наемных работников W_j, *налоги* Tx_j и *чистую прибыль* Prh_j. Чистая прибыль является как источником инвестиций в развитие экономики, так и доходов работодателя. Прибыль до уплаты налогов Pp_j и W_i — экзогенно заданные параметры. Их величины задаются внешними управленческими (административными) решениями на основе прогнозной оценки ожидаемой конъюнктуры и прежнего опыта. Наконец, сумма затрат на промежуточное потребление

и оплату труда составляет *производственные затраты* (*себестоимость*) $Pc_j = Pp_j + W_j$. Откуда $Pr_j = I_j - Pc_j$ или $Pr_j = V_j - W_j$.

Четвертым квадрантом таблицы МОБ, расположенным ниже второго квадранта, является *государственный бюджет* V_b, который представлен в $(n+1)$-м диагональном элементе таблицы МОБ. Госбюджет формируется как сумма всех налогов и других выплат. При этом V_b — экзогенный параметр, т. е. его величина, с одной стороны, соотносится с прошлогодним периодом, но в то же время задается внешними управленческими решениями.

В условиях равновесной экономики годовые продажи считаются равными годовым выпускам $X_i = I_i$, суммарная добавленная стоимость — суммарному потреблению $V = \sum_{j=1}^{n} V_j = Y = \sum_{i=1}^{n} Y_i$. В этом случае основные балансовые соотношения, записанные в относительных величинах, примут вид (Пересада, 2010)

$$I_i = r_{i1} I_1 + \ldots + r_{in} I_n + Yr_i I_{n+1}, \quad i = 1, \ldots, n,$$

где $r_{ij} = \dfrac{p_{ij}}{I_j}$ — элементы *матрицы относительных цен* $R\{r_{ij}\}$; I_{n+1} — *ВВП*; $Yr_i = \dfrac{Y_i}{I_{n+1}}$ — нормированные по *ВВП* компоненты вектора конечного потребления. Под *ВВП* (руб./год) здесь и далее будем понимать сумму добавленных стоимостей V_j, созданных в производственной сфере экономики, и бюджета V_b, который рассматривается как добавленная стоимость сферы потребления.

Динамическая модель МОБ

При построении динамической модели МОБ необходимо определиться с выбором фазовых переменных, однозначно описывающих состояние системы, и установить их объективные взаимосвязи с другими макроэкономическими параметрами. В качестве фазовых переменных будем рассматривать объемы выпуска продукции I_j по секторам экономики и *ВВП*. На рисунке представлена структурная схема элементов таблицы МОБ, отражающая балансовое соотношение, описанное выше: $V_j = W_j + Pr_j = W_j + Tx_j + Prh_j$.

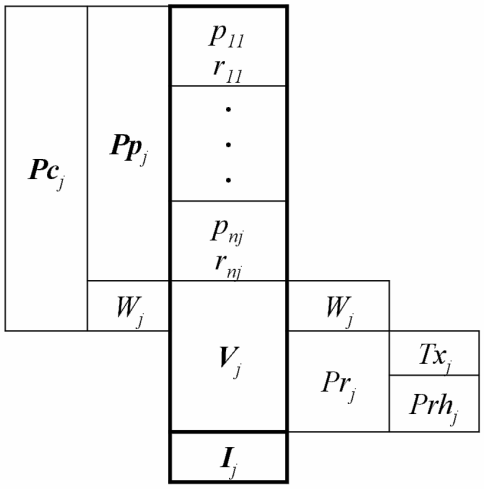

Рисунок. Структурная схема взаимосвязи элементов таблицы МОБ

Здесь каждая из величин является некоторой долей от стоимости суммарного выпуска продукции в j-м секторе (Пересада, 2010):

$$Pp_j = rp_j I_j, \quad V_j = (1 - rp_j) I_j, \quad rp_j = \sum_{i=1}^{n} r_{ij},$$
$$W_j = rw_j V_j = rw_j (1 - rp_j) I_j, \quad Pr_j = (1 - rw_j)(1 - rp_j) I_j,$$
$$W_j = Wr_j I_j, \quad Pc_j = Rs_j I_j, \quad Pr_j = (1 - Rs_j) I_j, \tag{2}$$

В (2) величина rp_j определяет суммарную долю промежуточного потребления Pp_j в выпуске I_j; величина rW_j есть доля оплаты труда W_j в выпуске I_j; rw_j — средняя ставка оплаты труда в j-м секторе; $Rs_j = rp_j + Wr_j$.

Введем в рассмотрение налог на прибыль tp и будем считать, что он один и тот же для всех секторов экономики. Тогда $Tx_j = tpPr_j$, $Prh_j = (1 - tp)Pr_j$. С учетом (2), получим представление для чистой прибыли

$$Prh_j = (1 - tp)(1 - rw_j)(1 - rp_j) I_j. \tag{3}$$

Теперь приступим к выводу дифференциальных уравнений. Известно, что объем инвестиций Cp_j, необходимый для расширения выпуска (ускорения производства), пропорционален требуемому ускорению (Пересада, 2010):

$$Cp_j(t) = Fe_j \dot{I}_j(t), \quad j = 1, \ldots, n, \tag{4}$$

где Fe_j — *фондоемкости* каждого сектора экономики. Фондоемкость характеризует затраты капитала на единицу прироста выпуска продукции в единицу времени. Отметим, что источники инвестиций Cp_j имеют различную природу, например, это может быть чистая прибыль или только ее часть. Соответственно получаются различные варианты динамической модели МОБ (Пересада и др., 2017).

Допустим, что источником инвестиций является чистая прибыль, полученная в секторах экономики, т. е. $Cp_j = Prh_j$. Тогда, используя представление (3) для чистой прибыли Prh_j в уравнении (4) и учитывая балансовые соотношения (1), получим систему дифференциальных уравнений

$$\dot{I}_j = \frac{(1 - tp)(1 - rw_j)(1 - rp_j)}{Fe_j}(r_{j1} I_1 + \ldots + r_{jn} I_n + Yr_j I_{n+1}), \quad j = 1, \ldots, n. \tag{5}$$

Для окончательного построения модели необходимо уравнение, описывающее динамику сферы потребления (бюджетной сферы), фазовой переменной которой является $I_{n+1} = ВВП$. Для этого введем понятие *обобщенного налога rg*, определяющего долю бюджета в *ВВП*: $V_b = rgI_{n+1}$. Учитывая определение *ВВП* и формулы (2), можно записать уравнение, описывающее структуру *ВВП,* и добавить его в систему балансовых соотношений (1):

$$I_{n+1} = V_1 + \ldots + V_n + V_b = (1 - rp_1) I_1 + \ldots + (1 - rp_n) I_n + rgI_{n+1}. \tag{6}$$

По аналогии с фондоемкостями секторов экономики, введем понятие *фондоемкости сферы потребления* Fe_b, которая определяет требуемый объем бюджетных инвестиций Cp_b на единицу прироста *ВВП* в единицу времени. Тогда, как и в (4), имеем

$$Cp_b(t) = Fe_b \dot{I}_{n+1}(t). \tag{7}$$

При этом *ВВП* делится на себестоимость бюджетной сферы и бюджетную прибыль, т. е. $I_{n+1} = Pc_b + Pr_b$. Долю Pp_b в *ВВП* обозначим rs_b, тогда $Pc_b = Rs_b I_{n+1}$, $Pr_b = (1 - Rs_b) I_{n+1}$. Если вся бюджетная прибыль идет на бюджетные инвестиции $Cp_b = Pr_b$, то, учитывая уравнения (6), (7), получим искомое $(n + 1)$-е дифференциальное уравнение

$$\dot{I}_{n+1} = \frac{1-Rs_b}{Fe_b}\left((1-rp_1)I_1 + \ldots + (1-rp_n)I_n + rgI_{n+1}\right). \quad (8)$$

Уравнение (8) дополняет систему (5). Таким образом, динамическая модель (5), (8) является полной, т. е. состоит из $(n+1)$ уравнений. Она позволяет анализировать влияние основных экономических показателей, таких как Rs_j, rp_j, rw_j, tp, rg, tp, rs_b, на динамику процесса производства и потребления.

Систему (5), (8) можно записать в векторной форме. Для этого введем в рассмотрение вектор фазовых переменных $I = (I_1, \ldots, I_n, I_{n+1})^T$. Получим

$$\dot{I} = DI, \quad (9)$$

где матрица системы $D = M\tilde{R}$. При этом

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} & Yr_1 \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} & Yr_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} & Yr_n \\ 1-rp_1 & 1-rp_2 & \cdots & 1-rp_n & rg \end{pmatrix},$$

$$M = \begin{pmatrix} \frac{(1-tp)(1-rw_1)(1-rp_1)}{Fe_1} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{(1-tp)(1-rw_n)(1-rp_n)}{Fe_n} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{1-Rs_b}{Fe_b} \end{pmatrix}.$$

Предложенная динамическая модель МОБ имеет аналогию с описанием механических объектов. Инвестиции Cp_j (в общем случае финансовые) аналогичны силам, приложенным к телу. Фондоемкости Fe_j — это аналоги массы, а величины $\dot{I}_j$ — ускорения, поскольку годовые выпуски продукции I_j представляют собой скорости производства (например, один млн автомобилей в год). Если источниками инвестиций являются внутренние резервы экономической системы (прибыль или ее отдельные части), то мы имеем дело с *собственными движениями* системы (как принято говорить в механике). Если же инвестиции носят внешний (плановый) характер, то модель будет описывать управляемый процесс экономического развития, что соответствует *управляемому движению* механической системы.

Задача оптимального управления ставкой налога на прибыль на основе нелинейной динамической модели МОБ

Покажем, как исходная динамическая модель МОБ (9) может быть модифицирована под конкретную прикладную задачу. Речь пойдет о задаче управления налогом на прибыль с целью оптимального управления макроэкономическими показателями региона. Предположим, что управляемым параметром является налог на прибыль. Это возможно на федеральном уровне власти. Обозначим теперь через tp базовую ставку налога, а через u_{tp} — его вариацию (управление),

удовлетворяющую естественным экономическим ограничениям: $|u_{tp}| \le L$, где $L > 0$, т. е. теперь налоговая ставка есть сумма $tp + u_{tp}$. Тогда первые n диагональных элементов матрицы M можно записать так:

$$(1 - tp - u_{tp})\beta_j, \quad \beta_j = \frac{(1 - rw_j)(1 - rp_j)}{Fe_j}, \quad j = 1, \ldots, n.$$

В этом случае модифицированная матрица примет вид

$$\tilde{M} = M + u_{tp} M_0, \quad M_0 = diag(-\beta_1, \ldots, -\beta_n, 0),$$

где M — матрица из системы (9). Учитывая представление для $\tilde{M}$, получим модификацию системы (9):

$$\dot{I} = DI + u_{tp} D_0 I, \quad |u_{tp}| \le L.$$

В системе (10) $D_0 = M_0 \tilde{R}$. Эта система является нелинейной, поскольку в правую часть входят произведения фазовых переменных и управляемых параметров. Нелинейное слагаемое представляет собой вектор

$$u_{tp} D_0 I = \left(-\beta_1 u_{tp} \sum_{k=1}^{n+1} r_{ik} I_k, \ldots, -\beta_n u_{tp} \sum_{k=1}^{n+1} r_{nk} I_k, 0 \right)^T.$$

Постановка задачи. На основе нелинейной модели (10) сформулируем следующую общую задачу оптимального управления. Требуется обеспечить заданный рост выпуска продукции и *ВВП* при минимизации налога на прибыль на заданном допустимом множестве его значений.

Эту задачу будем решать для экономик Германии и России на одном и том же интервале времени — 2012–2013 гг.

Описание численного эксперимента

Для идентификации параметров модели (10) использовались данные сайта WIOD за 2012–2013 гг. (World Input-Output Database (WIOD), 2018) и другие общедоступные источники информации: 1) данные Всемирного банка (The World Bank, 2018); 2) отчеты об исполнении консолидированного бюджета Российской Федерации (Казначейство России, 2018). Алгоритм определения параметров модели МОБ на основе таблиц WIOD подробно описан в работе (Пересада и др., 2017).

Для решения поставленной задачи, а также класса подобных задач был разработан программный комплекс в среде MATLAB. В данном разделе представлены результаты, полученные с применением этого программного продукта.

Таблицы национальных балансов WIOD имеют размеры 56×56, поэтому первым этапом решения задачи является реализация алгоритма агрегирования (Пересада и др., 2017). В рамках данного исследования рассматривается предельно возможный случай, когда агрегирование осуществляется до двух субъектов экономики — сферы производства и сферы потребления, т. е. $n = 2$, $I = (I_1, I_2)^T$, где I_1 — выпуск всей экономики региона, а I_2 — ее *ВВП*. На выходе первого этапа получаем 2×2 — матрицы D и D_0 системы (10).

Далее линеаризуем систему (10). Для случая $n = 2$ нелинейное слагаемое есть вектор

$$u_{tp} D_0 I = (-\beta_1 u_{tp} r_{11} I_1, 0)^T.$$

Первую компоненту этого вектора заменим линейной функцией с помощью метода наименьших квадратов:

$$\int_{I^l}^{I^u}\int_{-L}^{L}\left[r_{11}u_{tp}I_1 - au_{tp} - bI_1 - c\right]^2 du_{tp}dI_1 \to \min_{a,b,c},$$

где I^l и I^u есть некоторые предполагаемые границы изменения значения выпусков в производственной сфере на протяжении исследуемого периода. Например, в качестве I^l можно взять значение выпуска в начальный момент времени, а I^u — минимальное желаемое значение выпуска. Нетрудно убедиться, что параметры линейной функции единственны $(a^{opt}, b^{opt}, c^{opt}) = (\alpha,0,0)$, где $\alpha = 0{,}5r_{11}(I^l + I^u)$. Таким образом, получаем систему

$$\dot{I} = DI + Qu_{tp}, \quad Q = (-\beta\alpha, 0)^T. \tag{11}$$

На следующем этапе для системы (11) рассмотрим задачу оптимального программного управления с квадратичным функционалом качества в форме Лагранжа:

$$\int_0^1 u_{tp}^2(t)dt \to \min_{|u_{tp}|\le 0,1},$$

$$\dot{I} = D_{2012}I + Q_{2012}u_{tp}, \quad T = [0;1], \quad I(0) = I^{2012},$$

$$I_1(1) \ge \tilde{I}_1^{2013} + 0{,}05\left(\tilde{I}_1^{2013} - I_1^{2012}\right),$$

$$I_2(1) \ge \tilde{I}_2^{2013}, \quad \tilde{I}^{2013} = \exp(D)I^{2012}. \tag{12}$$

Задача (12) представляет собой математическую формализацию проблемы, описанной выше. Минимизация налога на прибыль описана здесь соответствующим интегральным критерием (функционалом), а рост экономики должен быть не меньше 5% приращения в предыдущем году.

Оптимальное управление в задаче (12) строится в классе кусочно-постоянных функций с периодом квантования, равным одному кварталу. Решение осуществляется в два этапа. На первом этапе задача оптимального программного управления (12) сводится к задаче квадратичного программирования, которую на втором этапе решаем с помощью метода внутренней точки, реализованного в виде функции quadprog в среде MATLAB.

В табл. 2, 3 содержатся результаты вычислительного эксперимента. В первых двух столбцах отражены значения выпусков, полученные из таблиц межотраслевого баланса WIOD за 2012–2013 гг. В третьем столбце представлен прогноз по выпускам $\tilde{I}^{2013}$ тносительная ошибка прогноза указана в скобках). В последних двух столбцах — прогнозы выпусков I_{opt}^{2013} для линеаризованной системы (11) и исходной системы (10), замкнутых построенным оптимальным программным управлением для системы (11). Относительные изменения значений выпусков по сравнению с $\tilde{I}^{2013}$ указаны в скобках.

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента для Германии

млн долл.	I^{2012}	I^{2013}	$\tilde{I}^{2013}$ **(отн. ошибка)**	I_{opt}^{2013}	
				лин. система	**нелин. система**
Производственная сфера	5 804 872	6 089 088	6 289 381 (3,289%)	6 313 607 (+0,385%)	6 345 643 (+0,895%)
Бюджетная сфера	3 653 849	3 860 434	3 954 325 (2,432%)	3 954 870 (+0,014%)	3 955 562 (+0,031%)

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента для России

млн долл.	I^{2012}	I^{2013}	$\tilde{I}^{2013}$ (отн. ошибка)	I_{opt}^{2013}	
				лин. система	нелин. система
Производственная сфера	3 274 647	3 465 136	3 362 310 (–2,967%)	3 363 151 (+0,126%)	3 368 649 (+0,289%)
Бюджетная сфера	1 973 293	2 037 199	2 175 227 (6,775%)	2 179 889 (+0,006%)	2 180 044 (+0,013%)

Таблица 4

Оптимальное управление ставкой налога на прибыль для России и Германии

u_{tp}	1-й квартал	2-й квартал	3-й квартал	4-й квартал
Германия	–8,14%	–8,06%	–7,99%	–7,92%
Россия	–9,20%	–9,17%	–9,15%	–9,12%

В табл. 4 представлены поквартальные вариации ставки налога на прибыль для Германии и России соответственно. Они представляют собой оптимальное программное управление, построенное на основе модели (12).

Заключение

Подведем итоги и обсудим возможные направления дальнейших исследований. Прежде всего отметим универсальность разработанного подхода моделирования макроэкономических тенденций. В предложенной динамической модели МОБ валовой внутренний продукт рассматривается в качестве одной из фазовых переменных, что обеспечивает полноту модели и тем самым выгодно отличает ее от остальных вариантов, известных в научной литературе. Это позволяет анализировать влияние макроэкономических параметров как на динамику процесса производства, так и потребления, что особенно важно при подготовке социально значимых управленческих решений на уровне региона и страны в целом.

В ходе работы над данной темой в среде MATLAB разработан программный комплекс, который обеспечивает все этапы моделирования. Речь идет о первичной обработке общедоступных файлов из мировых и отечественных баз данных с целью идентификации параметров модели МОБ; реализации алгоритма агрегирования экономики до любого наперед заданного уровня размерности; построении прогнозов выпуска товаров, услуг и ВВП; реализации алгоритмов построения оптимальных программных управлений с целью моделирования макроэкономических тенденций. При этом основные экзогенные макроэкономические параметры, такие как налог на прибыль, относительные ставки оплаты труда по секторам экономики и некоторые другие, можно фиксировать в рамках численного эксперимента или же рассматривать их вариации в качестве управлений с целью обеспечения наперед заданной динамики развития экономики. Все это делает предложенную модель методологически гибкой и универсальной. Ее легко настроить на конкретную прикладную задачу, что и было показано на примере оптимального управления ставкой налога на прибыль. Сказанное позволяет сделать вывод о том, что предложенный подход моделирования и его реализация в виде пакета прикладных программ представляют собой некоторый прообраз начального этапа внедрения цифровых технологий в практику подготовки научно обоснованных управленческих решений на уровне макроэкономики.

Результаты применения разработанных алгоритмов к анализу экономик Германии и России, с одной стороны, оказались близки, что свидетельствует о стабильности работы программного обеспечения. С другой стороны, полученные в рамках численного эксперимента различия в полученных значениях налога на прибыль все-таки достаточно велики, а их влияние на рост экономики не так существенно, как ожидалось. В связи с этим можно сделать несколько выводов. Во-первых, очевидно, что столь частое изменение налога на прибыль (раз в квартал) не вполне оправдано экономически. Во-вторых, необходимо увеличивать горизонт прогноза и управления до нескольких лет, применяя схему «предиктор-корректор», представленную, в том числе, и в среде MATLAB. Кроме того, следует признать, что структура модели нуждается в доработке. Модель должна позволять анализировать процессы технологического развития, инфляции и амортизации. В дальнейшем целесообразно провести сравнительный анализ различных методов линеаризации исходных нелинейных моделей, а также проанализировать взаимосвязи поведения нелинейных моделей и их линеаризаций.

Источники

Белоусова М. В., Попков А. С. Построение динамической модели МОБ на основе WIOD // Процессы управления и устойчивость. 2016. Т. 3. № 1. С. 601–606.

Ведута Н. И. Социально эффективная экономика / под общ. ред. Е. Н. Ведута. М., 1999.

Величко М. В., Ефимов В. А., Зазнобин В. М. Экономика инновационного развития. М., 2017.

Волик К. М., Смирнов Н. В. Построение области достижимости в управляемой динамической модели межотраслевого баланса // Процессы управления и устойчивость. 2015. Т. 2. № 1. С. 597–603.

Всероссийский форум СРСЦ — 2017 [Электронный ресурс] // Официальный сайт Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН). URL: http://www.frccsc.ru/node/493 (дата обращения: 28.10.2018).

Гирдюк Д. В. Оптимальное управление средними ставками оплаты труда на основе нелинейной динамической модели межотраслевого баланса // Процессы управления и устойчивость. 2018. Т. 5. № 1. С. 450–457.

Глушков В. М. Основы безбумажной информатики. М., 1982.

Гранберг А. Г. Динамические модели народного хозяйства. М., 1985.

Елисеева И. И., Пересада В. П. Межотраслевой баланс и экономическое прогнозирование: учебное пособие. СПб., 2003.

Законодательство Российской Федерации. Сборник основных федеральных законов Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: https://fzrf.su/zakon/o-strategicheskom-planirovanii-172-fz/ (дата обращения: 28.10.2018).

Казначейство России. Консолидированный бюджет Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: http://www.roskazna.ru/ispolnenie-byudzhetov/konsolidirovannyj-byudzhet/ (дата обращения: 28.10.2018).

Леонтьев В. В. Межотраслевая экономика / пер. с англ., автор предисл. и науч. ред. А. Г. Гранберг. М., 1997.

Пересада В. П., Смирнов Н. В., Смирнова Т. Е. Статические и динамические модели многопродуктовой экономики: учеб. пособие. СПб., 2017.

Пересада В. П. Управление динамикой развития экономики на базе межотраслевого баланса. СПб., 2010.

Попков А. С. Идентификация динамической модели межотраслевого баланса для экономики России и оптимальное распределение инвестиций на ее основе // Процессы управления и устойчивость. 2015. Т. 2. № 1. С. 696–701.

Правительство Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: http://government.ru/docs/28653/ (дата обращения: 28.10.2018).

Росстат. [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/ (дата обращения: 28.10.2018).

Смирнов Н. В., Смирнова Т. Е. Прогнозирование макроэкономических тенденций и управление многопродуктовой экономикой на основе динамических моделей межотраслевого баланса // Финансы и бизнес. 2015. № 1. С. 42–53.

Федосеев В. В., Гармаш А. Н., Дайитбегов Д. М. и др. / под ред. В. В. Федосеева. Экономико-математические методы и прикладные модели. М., 1999.

International Input-Output Association (IIOA). [Электронный ресурс]. URL: http://www.iioa.org/ (дата обращения: 28.10.2018).

Peresada V. P., Smirnov N. V., Smirnova T. E. Development control of a multicommodity economy based on the dynamical input-output model // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2014. № 4. С. 119–132.

The World Bank. [Электронный ресурс]. URL: https://data.worldbank.org (дата обращения: 28.10.2018).

World Input-Output Database (WIOD). [Электронный ресурс]. URL: http://www.wiod.org/ (дата обращения: 28.10.2018).

References

Belousova M. V., Popkov A. S. Postroenie dinamicheskoj modeli MOB na osnove WIOD [Building a dynamic model of BOM based on WIOD]. *Processy upravleniya i ustojchivost'* [*Control Processes and Stability*], 2016, vol. 3, N 1, pp. 601–606. (In Russian)

Eliseeva I. I., Peresada V. P. *Mezhotraslevoj balans i ehkonomicheskoe prognoziro-vanie: Uchebnoe posobie* [*Inter-sectoral balance and economic forecasting: Tutorial*]. St. Petersburg, 2003. (In Russian)

Fedoseev V. V., Garmash A. N., Dayitbegov D. M. et al. / ed. by V. V. Fedoseyev. *Ehko-nomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli* [*Eco-nomico-mathematical methods and applied models*]. Moscow, 1999. (In Russian)

Girdyuk D. V. Optimal'noe upravlenie srednimi stavkami oplaty truda na osnove nelinejnoj dinamicheskoj modeli mezhotraslevogo balansa [Optimal management of average wage rates on the basis of a non-linear dynamic model of inter-sectoral balance]. *Processy upravleniya i us-tojchivost'* [*Management processes and sustainability*], 2018, vol. 5, N 1, pp. 450–457. (In Russian)

Glushkov V. M. *Osnovy bezbumazhnoy informatiki* [*Fundamentals of Paperless Computer Science*]. Moscow, 1982. (In Russian)

Granberg A. G. *Dinamicheskie modeli narodnogo hozyajstva* [*Dynamic models of national economy*]. Moscow, 1985. (In Russian)

International Input-Output Association (IIOA). Available at: http://www.iioa.org/ (access date: 10.28.2018).

Kaznachejstvo Rossii. Konsolidirovannyj byudzhet Rossijskoj Federacii [*Treasury of Russia. Consolidated budget of the Russian Federation*]. Available at: http://www.roskazna.ru/ispolnenie-byudzhetov/konsolidirovannyj-byudzhet/ (access date: 10.28.2018). (In Russian)

Leontyev V. V. *Mezhotraslevaya ehkonomika / per. s angl., avtor predisl. i nauch. red. A. G. Granberg* [*Inter-sectoral economy. Per. from English, the author of the foreword and scientific. ed. A. G. Granberg*]. Moscow, 1997. (In Russian)

Peresada V. P. *Upravlenie dinamikoj razvitiya ehkonomiki na baze mezhotraslevogo balansa* [*Managing the dynamics of economic development based on inter-sectoral balance*]. St. Petersburg, 2010. (In Russian)

Peresada V. P., Smirnov N. V., Smirnova T. E. Development of a multicommodity economy based on the dynamical input-output model. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo uni-versiteta. Seriya 10: Prikladnaya matematika. Informatika. Processy upravleniya* [*Bulletin of St. Petersburg University. Series 10: Applied Mathematics. Computer science. Management processes*], 2014, N 4, pp. 119–132.

Peresada V. P., Smirnov N. V., Smirnova T. E. *Staticheskie i dinamicheskie modeli mnogoproduktovoj ehkonomiki: Uchebnoe posobie.* [Static *and dynamic models of a multi-product economy: Tutorial*]. St. Petersburg, 2017. (In Russian)

Popkov A. S. Identifikaciya dinamicheskoj modeli mezhotraslevogo balansa dlya ehkonomiki Rossii i optimal'noe raspredelenie investicij na ee osnove [Identification of a dynamic model of intersectoral balance for the Russian economy and the optimal distribution of investments based on it]. *Processy upravleniya i ustojchivost'* [*Management processes and sustainability*], 2015, vol. 2, N 1, pp. 696–701. (In Russian)

Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii [*Government of the Russian Federation*]. Available at: http://government.ru/docs/28653/ (access date: 10.28.2018). (In Russian)

Rosstat [*Rosstat*]. Available at: http://www.gks.ru/ (access date: 28.10.18). (In Russian)

Smirnov N. V., Smirnova T. E. Prognozirovanie makroehkonomicheskih tendencij i upravlenie mnogoproduktovoj ehkonomikoj na osnove dinamicheskih modelej mezhotraslevogo balansa [Prediction of macroeconomic trends and management of a multi-product economy based on dynamic models of intersectoral balance]. *Finansy i biznes* [*Finance and business*], 2015, N 1, pp. 42–53. (In Russian)

The World Bank. Available at: https://data.worldbank.org (access date: 28.10.2018).

Veduta N. I. *Social'no ehffektivnaya ehkonomika / pod obshchej red. N. I. Veduta* [*Socially effective economy: under the general ed. N. I. Veduta*]. Moscow, 1999. (In Russian)

Velichko M. V., Efimov V. A., Zaznobin V. M. *Ehkonomika innovacionnogo razvitiya* [Economy of Innovative Development]. Moscow, 2017. (In Russian)

Volik K. M., Smirnov N. V. Postroenie oblasti dostizhimosti v upravlyaemoj dina-micheskoj modeli mezhotraslevogo balansa [Construction of a reachability domain in a controlled dynamic model of interindustry balance]. *Processy upravleniya i ustojchivost'* [*Control Processes and Stability*], 2015, vol. 2, N 1, pp. 597–603. (In Russian)

Vserossijskij forum SRSC — 2017 (Ehlektronnyj resurs) [*All-Russian Forum SRSTS — 2017* (Electronic resource)]. Official site of the Federal Research Center "Informatics and Management„ of the Russian Academy of Sciences (FIZ IU RAS). Available at: http://www.frccsc.ru/node/493 (request date: 10.28.2018). (In Russian)

World Input-Output Database (WIOD). Available at: http://www.wiod.org/ (access date: 28.10.2018).

Zakonodatel'stvo Rossijskoj Federacii. Sbornik osnovnyh federal'nyh zakonov Rossijskoj Federacii. [*Legislation of the Russian Federation. Collection of basic federal laws of the Russian Federation*]. Available at: https://fzrf.su/zakon/o-strategicheskom-planirovanii-172-fz/ (access date: 10.28.2018). (In Russian)