

# Анализ трансмиссионного механизма монетарной политики на основе байесовских векторных авторегрессий

Александра БЕЗБОРОДОВА



Экономист,  
магистр экономических наук

Юрий МИХАЛЕНКО



Экономист,  
магистр физико-математических наук

**Ключевые слова:**

*трансмиссионный механизм монетарной политики Республики Беларусь, кредитный канал, канал обменного курса, процентный канал, байесовский подход в эконометрическом анализе, априорное предположение, гиперпараметры.*

Существует достаточно большое количество исследований, посвященных изучению трансмиссионного механизма монетарной политики различных стран [5; 12; 14; 17; 20]. Для Беларуси и других стран с малой открытой переходной экономикой выделяют три основных канала передаточного механизма: канал обменного курса, канал процентной ставки и канал кредитования. При этом следует отметить, что функционирование трансмиссионного механизма монетарной политики в стране с переходной экономикой отличается от его функционирования в развитых странах [5; 21]. Данные различия заключаются в эффективности и силе функционирования конкретного канала и связаны, прежде всего, со специфическими свойствами структуры экономики, а именно со структурой финансового сектора [3] и уровнем валютного замещения. Так, в исследованиях, концентрирующихся на анализе трансмиссионного механизма монетарной политики стран Центральной и Восточной Европы (ЦВЕ), устанавливается слабая реакция промежуточных переменных передаточного механизма на изменения монетарной политики и, более того, незначимое воздействие промежуточных переменных монетарного механизма на целевые показатели, такие как ВВП и темпы его роста. Однако при этом многие авторы утверждают, что за последние годы значимость каналов трансмиссионного механиз-

ма монетарной политики развивающихся стран повышается [5].

Эмпирический анализ трансмиссионного механизма стран с переходной экономикой осуществлялся на основе ряда методов: малые структурные макроэкономические модели [9], векторные авторегрессии и структурные векторные авторегрессии [14], а также коинтеграционный анализ [5].

Несмотря на различные стратегии в оценивании параметров взаимосвязи макропеременных, основные теоретические выводы исследований согласованы: для стран с переходной экономикой канал обменного курса развит сильнее по сравнению с каналом процентной ставки, при этом первый также можно назвать более мощным и для стран с гибким режимом обменного курса.

В сравнении с развитыми странами передаточный механизм развивающихся стран достаточно слаб, что обусловливается структурными и институциональными различиями, а именно низкой степенью развития финансового сектора [3]. В работе [5] отмечается, что данные отличительные характеристики переходной экономики могут привести к тому, что традиционные инструменты монетарной политики оказываются менее эффективными, чем предполагается в соответствии с экономической теорией. Тем не менее трансмиссионный механизм – динамическое явление, характеризующееся постоянными качественными

изменениями. В экономической литературе отмечается, что передаточный механизм монетарной политики – изменяющееся во времени явление, эндогенное по отношению к характеристикам экономической системы.

Таким образом, из вышесказанного вытекает актуальность оценки трансмиссионного механизма денежно-кредитной политики Республики Беларусь на основе современных эмпирических данных. Модели каналов помогут установить степень влияния монетарной политики на реальный сектор и сформулировать определенные предложения по ее корректировке. Перечислим основные вопросы исследования:

- степень реакции реального сектора на изменения монетарной политики;
- скорость реакции выпуска и цен на изменения монетарной политики и продолжительность данной реакции;
- значимость каждого отдельного канала трансмиссионного механизма.

Модель трансмиссионного механизма будет не только представлять собой количественную оценку взаимосвязей основных макроэкономических переменных, установленную на эмпирических данных, но и базироваться на экономической теории, а также иметь практическое применение в процессе выработки монетарной политики. Для реализации поставленной задачи используется один из новейших подходов в эконометрическом анализе – байесовские векторные авторегрессионные модели (BVAR). Описываемый метод оценивания параметров модели в значительной степени отличается от классического возможностью одновременного учета в оценках параметров как имеющихся эмпирических данных, так и экспертных предположений.

По результатам проведенного исследования можно увидеть, что эмпирически установленное влияние изменений монетарной политики на реальный сектор белорусской экономики схоже с оцененным в развитых странах, но не полностью аналогично ему. Прежде всего, данный эффект наблюдается из-за низкой

степени развития финансового рынка. Следует также отметить такую особенность регулирования монетарной политики, как широкое применение интервенций. Однако при этом одной из черт функционирования трансмиссионного механизма денежно-кредитной политики Республики Беларусь является работоспособность его процентного канала.

### Трансмиссионный механизм монетарной политики: теория

Прежде чем перейти к анализу трансмиссионного механизма монетарной политики Беларуси, рассмотрим основные результаты исследований по странам СНГ. Одним из первых общих выводов нужно назвать утверждение, что денежно-кредитная политика оказывает значительное влияние на поведение экономических агентов [18]. Однако каналы, через которые данное влияние оказывается, достаточно сложны и отличаются по значимости в различных странах, поэтому единогласного мнения относительно вопроса, каким образом монетарная политика воздействует на реальный сектор описываемых стран, не существует.

Теоретически монетарный трансмиссионный механизм определяется и формулируется достаточно строго, как последовательность макроэкономических переменных, через которые изменения монетарной политики оказывают влияние на реальные переменные, такие как занятость, выпуск [10]. Традиционно выделяют следующие каналы трансмиссионного механизма денежно-кредитной политики: канал процентной ставки, канал валютного курса, широкий канал кредитования, узкий канал кредитования, канал благосостояния и др.

В литературе существует описание общей спецификации совокупности каналов передаточного механизма, при этом нет однозначного мнения относительно значимости каждого из этих каналов в трансмиссионном механизме, а также в нюансах функционирования. Причиной отсутствия консенсуса по описываемому вопросу является тот факт, что монетарная политика

обеспечивает первоначальный импульс в процессе функционирования трансмиссионного механизма, таким образом, последующие импульсы остаются неподконтрольными монетарным властям. В процессе оценки каналов трансмиссионного механизма необходимо понимать, что сила, с которой монетарные власти могут влиять на реальный сектор, в значительной степени зависит от структуры экономики, и в частности от структуры финансового рынка.

В процессе анализа трансмиссионного механизма стран СНГ прежде всего должны быть оценены и проанализированы три наиболее важных канала. Одним из них является канал обменного курса [10; 17]. В странах с фиксированным обменным курсом внутренняя процентная ставка определяется внешней процентной ставкой, к которой привязана отечественная валюта, что накладывает определенные ограничения на проводимую монетарную политику. В странах с плавающим обменным курсом центральный банк может оказывать влияние на обменный курс повышением или снижением процентной ставки так, что канал обменного курса будет играть значимую роль в трансмиссионном механизме денежно-кредитной политики. Также, согласно теории Кейнса, денежная экспансия приводит к удешевлению национальной валюты, что положительно влияет на агрегированный выпуск через увеличение чистого экспорта. Однако в то же время может иметь место иная последовательность реакций реальных переменных на монетарные импульсы в экономике. Девальвация национальной валюты снижает чистое богатство и делает инвестиции менее привлекательными, что, в свою очередь, негативно влияет на спрос на заемные средства. В результате снижается объем инвестиций и выпуска [10].

При анализе трансмиссионного механизма особое внимание необходимо уделить процентному каналу. Следует отметить, что в большинстве стран СНГ прямое влияние процентной ставки на реальный сектор экономики будет незначительным,

прежде всего из-за низкой степени развития финансового сектора. Отмеченный факт приводит к тому, что процентная ставка не может выполнять функцию промежуточного ориентира в проводимой монетарной политике. Более того, в экономике, характеризующейся высокими инфляционными процессами, канал процентной ставки теряет свою значимость из-за высокой волатильности инфляции [16]. Фактическая реальная процентная ставка более контролируема, когда инфляция находится на низком уровне, и менее волатильна, чем в противоположном случае.

Кредитный канал тесно связан с процентным каналом таким образом, что при шоке монетарной политики, выраженном в расширении предложения кредитов, процентная ставка усиливает наблюдаемое влияние на реальный сектор. Однако описываемый канал в отличие от процентного оказывает косвенное влияние на реальный сектор экономики. Существует два различных подхода к определению кредитного канала трансмиссионного механизма монетарной политики. Один из них – широкий канал кредитования, в котором несовершенство финансового рынка играет ключевую роль [2]. В данном случае изменения монетарной политики влияют на процентную ставку через изменения политики кредитования, что, в свою очередь, оказывает влияние на инвестиции в экономику. В то же время в работе [10] канал кредитования отдельно не выделяется, но включается в канал цен финансовых активов и активов, выраженных в недвижимом имуществе. В частности, в соответствии с определенным каналом цен на финансовые активы при возрастании денежного предложения процентные ставки снижаются, в результате чего инвесторы реструктурируют свои активы, что приводит к возрастанию цен на акции. Рост фондового рынка повышает собственный капитал инвесторов, и, таким образом, заемщики имеют возможность осуществлять большие заимствования. В свою очередь, возрастание объемов кредитования приводит к росту инвести-

ций и совокупного выпуска. Канал цен на активы, выраженные в недвижимом имуществе, также частично охватывает кредитный канал. Рост цен на реальные активы улучшает баланс банковской системы и повышает их возможность в предоставлении кредитов, что выражается в росте инвестиций и агрегированного выпуска.

Следует отметить, что широкий канал кредитования применяется при анализе трансмиссионного механизма развитых стран. В ряде стран СНГ финансовый рынок характеризуется низкой степенью развития или практически не существует [18]. Поэтому при анализе трансмиссионного механизма денежно-кредитной политики данных стран используется именно второй подход к определению канала кредитования – узкий канал кредитования. Описываемый канал основывается на факте, что в данном случае банки выступают как держатели депозитов и одновременно как источники заемных средств [1]. Функционирование канала осуществляется за счет фирм, выступающих заемщиками, и регулирования денежного предложения монетарными властями, обуславливающего изменения в объеме банковского кредитования. Организации не могут необоснованно произвести рефинансирование банковского кредита за счет других финансовых инструментов, что приводит к сокращению инвестиционных расходов. В работе [1] описано, каким образом изменения монетарной политики воздействуют на реальный сектор экономики через кредитный канал. Так, шок денежного предложения приводит к увеличению объемов предоставляемых кредитов, что, в свою очередь, оказывает отрицательное влияние на процентную ставку, а положительное – на агрегированный выпуск.

Таким образом, шок монетарной политики передается на реальный сектор экономики через различные каналы трансмиссионного механизма. Ожидается, что процентный канал наименее значим в странах с переходной экономикой, что обуславливается высоким уровнем инфляции и ее значительной волатильно-

стью. Благодаря развивающемуся сектору финансовых услуг кредитный канал, отражающий косвенное влияние процентной ставки на совокупный выпуск, требует особого внимания к своему анализу. В ряде стран СНГ, где наблюдаются инфляционное давление и высокая степень долларизации экономики, канал обменного курса играет важную роль в анализе монетарного трансмиссионного механизма. Также из-за того, что финансовый рынок имеет низкую степень развития, анализ описываемого канала не менее важен, чем рассмотрение и оценка канала кредитования.

По результатам теоретического обзора в целях проведения анализа трансмиссионного механизма Республики Беларусь были выделены три наиболее важных канала: канал обменного курса, канал процентной ставки и канал кредитования. Схема функционирования данных каналов передаточного механизма белорусской экономики представлена на *рисунке*.

Наиболее экзогенной макроэкономической переменной в представленной схеме нужно назвать денежное предложение, шок которого в соответствии с экономической теорией оказывает положительное влияние на денежную массу и кредиты. Именно через данные три макроэкономические переменные функционирует кредитный канал. Положительный отклик кредитов оказывает влияние на денежную массу, что обуславливается действием мультипликатора, а также может привести к увеличению инвестиций и потребления. Однако в случае, когда в экономике наблюдается полная загрузка производственных мощностей, дефицит рабочей силы, рост кредитов обусловит лишь повышение уровня цен и не скажется на реальных величинах, таких как инвестиции и потребление. Согласно теории положительные изменения в динамике внутреннего потребления приводят к возрастанию импорта, а также влияют на объем ВВП, который, в свою очередь, оказывает влияние на инфляцию.

Ускорение темпов роста денежной массы также приводит к



### Теоретические аспекты реализации байесовских векторных авторегрессионных моделей

В основе байесовского подхода оценивания параметров эконометрических моделей лежит идея объединения экспертных предположений относительно априорного распределения статистических данных и непосредственный анализ самих эмпирических данных. В отличие от классических подходов статистического анализа, предполагающих построение оценки совокупности параметров модели на основе статистических данных, байесовский подход подразумевает использование предположений относительно априорных распределений оцениваемых параметров. Например, у нас есть обоснованное априорное предположение о том, что коэффициент при первой авторегрессионной компоненте авторегрессионной модели обменного курса равняется единице, в то время как оставшиеся коэффициенты при лаговых переменных равняются нулю. Такое априорное предположение соответствует допущению о том, что динамика обменного курса описывается процессом случайного блуждания, и означает, что изменения в динамике обменного курса полностью непредсказуемы. Байесовский подход к оцениванию параметров данной авторегрессионной модели позволит учесть первоначальное допущение относительно параметров модели и оценить их на основе имеющейся статистической информации по обменному курсу. Априорное предположение относительно определенного параметра модели может иметь эмпирическое либо теоретическое обоснование.

При реализации байесовского подхода априорные предположения относительно оцениваемых параметров модели  $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k\}$  могут быть определены в виде функции плотности априорного распределения вероятностей  $p(\theta)$ . Например, рассмотрим авторегрессионную модель обменного курса:

$$s_t = \theta_1 s_{t-1} + \theta_2 s_{t-2} + \dots + \theta_k s_{t-k} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $s_t$  – значения обменного курса в момент времени  $t$ ;

$\varepsilon_t$  – ошибка модели, являющаяся «белым шумом».

Предположим, что параметры  $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k\}$  распределены независимо и имеют плотности распределения  $p(\theta_1), p(\theta_2), \dots, p(\theta_k)$ . Априорное предположение, заключающееся в формализации динамики обменного курса как процесса случайного блуждания, можно записать математически следующим образом:

$$E[\theta_i] = \int_{-\infty}^{\infty} \theta_i p(\theta_i) d\theta_i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 0, & i \neq 1 \end{cases}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (2)$$

где  $E[\ ]$  – математическое ожидание.

Статистическое оценивание параметров модели в байесовском подходе производится на основе построения апостериорного распределения, учитывающего как априорные экспертные предположения, так и эмпирические данные. При этом априорное распределение параметров  $\theta$ , описываемое безусловной плотностью распределения  $p(\theta)$ , корректируется с учетом информации, содержащейся в выборке данных и описываемой условной функцией плотности распределения  $p(s_t | \theta)$ .

Для вывода апостериорной функции плотности распределения  $p(\theta | s_t)$  используется формула Байеса:

$$p(\theta | s_t) = \frac{p(s_t | \theta) p(\theta)}{p(s_t)}, \quad (3)$$

где  $p(s_t)$  – безусловная плотность распределения.

На основе полученного апостериорного распределения строятся точечные или интервальные оценки параметров  $\theta$ . Как правило, в качестве точечной оценки параметра  $\theta$  выступает среднее значение апостериорного распределения [4].

При прогнозировании временных рядов байесовский подход широко используется для оценивания векторных авторегрессионных моделей (VAR). Байесовский подход к оцениванию VAR был описан в работе [4]. Для формализации априорных предположений, предложенных в данном исследовании, использовался подход Литтермана [15]. Рассматриваемые в упомянутом исследовании  $n$ -мерные модели VAR для

нестационарных временных рядов имеют вид:

$$y_t = B_1 y_{t-1} + \dots + B_k y_{t-k} + \mu + \varepsilon_t, \quad (4)$$

где  $y_t$  – вектор размерности  $(n \times 1)$  нестационарных временных рядов;

$\mu$  – вектор констант размерности  $(n \times 1)$ ;

$\varepsilon_t$  – вектор ошибок размерности  $(n \times 1)$ ;

$B_1, \dots, B_k$  – матрицы параметров модели размерности  $(n \times n)$ .

Векторная авторегрессионная модель может быть представлена как система уравнений, в которой каждая из переменных зависит от константы и переменных, участвующих в данной системе, взятых с лагом порядка от 1 до  $k$ . Каждое уравнение системы включает одинаковое количество объясняющих переменных и может быть оценено по методу наименьших квадратов (МНК).

Однако приведенная модель (4) содержит  $n + k n^2$  оцениваемых параметров. Таким образом, оценки параметров векторной авторегрессионной модели на основе эмпирических данных зачастую неточны и незначительно отличаются от нуля. Проблема чрезмерной параметризации особенно характерна при малых объемах выборок. Во многих исследованиях показывается, что прогнозирование динамики макропеременных на основе векторных авторегрессионных моделей, оцененных по МНК, не дает качественных результатов.

Таким образом, с целью решения проблемы чрезмерной параметризации в описываемой работе аналогично исследованию [4] предложен байесовский подход к оцениванию параметров модели (4), отражающей спецификацию трансмиссионного механизма денежно-кредитной политики в общем виде, при этом одним из основных вопросов при реализации данного подхода остается корректное задание предположения относительно априорного распределения параметров модели.

#### Проблема выбора априорных распределений параметров модели

Выбор априорного распределения, как правило, обосновывается предварительными имеющимися предположениями относительно

исследуемого процесса. При этом среди множества возможных априорных распределений выбираются семейства, сопряженные по распределению с наблюдаемыми данными, то есть такие семейства априорных распределений, для которых полученное на основе формулы (3) апостериорное распределение будет принадлежать тому же семейству распределения вероятностей. Так, например, в случае предположения о нормальности распределения исследуемых данных апостериорное распределение будет принадлежать нормальному семейству распределений, а выбор априорных распределений будет проведен среди распределений, сопряженных нормальному.

Предположение о нормальности распределения оцениваемых параметров является стандартным при построении моделей для анализа экономических взаимосвязей [19]. Исходя из этого, в статье рассматриваются следующие предположения относительно априорного распределения параметров модели:

- предположение относительно независимого нормального распределения параметров модели [13];

- априорное распределение, отражающее скудность априорных знаний (САЗ-априорное распределение) [8; 19];

- предположение относительно совместного нормального распределения параметров модели [11];

- предположение, учитывающее ограничения, накладываемые на параметры VAR [6].

В общем случае каждое конкретное предположение относительно априорного распределения параметров модели характеризуется собственными параметрами, которые принято называть *гиперпараметрами*. Для различных априорных распределений наборы гиперпараметров различаются. Таким образом, задача выбора априорного распределения включает задачу выбора гиперпараметров априорного распределения.

*Предположение относительно независимого нормального распределения параметров модели*

В рамках данного предположения для каждого уравнения  $i$  модели плотность априорного

распределения параметров может быть представлена следующим образом:

$$\beta_i \sim N(\tilde{\beta}_i, \tilde{\Omega}_i), \quad (5)$$

где  $\tilde{\beta}_i, \tilde{\Omega}_i$  – соответственно математическое ожидание и ковариационная матрица априорного распределения для  $i$ -го уравнения.

Для определения априорного распределения параметров модели широко используется подход, предложенный Литтерманом в 1980 г. [13]. Данный подход исходит из предположения о том, что каждый из временных рядов модели может быть описан как процесс случайного блуждания. В этом случае математическое ожидание априорного распределения может быть представлено для каждого уравнения как  $\tilde{\beta}_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ , где компонент, равный единице, имеет индекс  $i$  и обозначает коэффициент при первом лаге эндогенной переменной в уравнении  $i$ . Для определения элементов ковариационной матрицы  $\tilde{\Omega}_i$  вводятся гиперпараметры  $\pi_1, \pi_2$ , определяющие «узость» [13] отклонений компонент математического ожидания априорного распределения. Элементы ковариационной матрицы рассчитываются по формуле:

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \begin{cases} \pi_1 / k, & \text{для коэффициентов при} \\ & \text{переменной с индексом } i \\ \pi_2 \sigma_i^2, & \text{для коэффициентов при} \\ k \sigma_j^2, & \text{переменной с индексом } j \neq i \end{cases}, \quad (6)$$

где  $k$  – порядок авторегрессии;  $\sigma_i^2, \sigma_j^2$  – квадраты отклонений для переменных  $i, j$ .

Таким образом, после определения априорного распределения осуществляется переход от априорного распределения (5) к апостериорному распределению:

$$\beta_i | Y \sim N(\bar{\beta}_i, \bar{\Omega}_i), \quad (7)$$

где  $\bar{\beta}_i = \bar{\Omega}_i (\bar{\Omega}_i^{-1} \tilde{\beta}_i + \sigma_i^{-2} X' Y_i)$ ,  $\bar{\Omega}_i = (\bar{\Omega}_i^{-1} + \sigma_i^{-2} X' X)^{-1}$ ,  $Y_i$  – вектор эндогенных переменных уравнения  $i$ ;  $X$  – матрица лагов эндогенных переменных.

Оптимальные значения гиперпараметров различны для каждой конкретной модели. Их выбор может осуществляться, например, на основе критерия, предложенного в работе [13] и состоящего в выборе

гиперпараметров, при которых у построенной модели наилучшие прогностические свойства.

*Априорное распределение, отражающее скудность априорных знаний*

Использование САЗ-априорных распределений целесообразно в случае, когда сделать какое-либо априорное предположение относительно значений оцениваемого параметра не представляется возможным. Для формализованного представления априорной плотности оцениваемого параметра модели  $\theta_i$ , который теоретически может принимать любые значения на бесконечном или конечном интервале, Джеффрис в 1957 г. [11] предложил считать априорную плотность данного параметра постоянной.

В качестве плотности априорного распределения в [8] предложено использовать:

$$p(\beta, \Sigma) \propto |\Sigma|^{-(n+2)/2}, \quad (8)$$

где  $n$  – число переменных модели;  $\Sigma$  – ковариационная матрица остатков модели.

В этом случае совместное апостериорное распределение оцениваемых параметров модели примет вид [8]:

$$\beta | \Sigma, Y \sim N(\hat{\beta}, \Sigma \otimes (X' X)^{-1}), \Sigma | Y \sim iW((Y - X\hat{B})(Y - X\hat{B})', T - k), \quad (9)$$

где  $\hat{\beta}, \hat{B}$  – МНК-оценки параметров модели в векторной и матричной форме;

$\otimes$  – произведение Кронекера;  $iW(\cdot; T-k)$  – обратное распределение Уишарта с  $T-k$  степенями свободы.

Необходимо отметить, что в случае данного априорного предположения отсутствует необходимость выбора гиперпараметров.

*Предположение относительно совместного нормального распределения оценок параметров модели*

Представленные выше предположения относительно априорного распределения параметров имеют ряд ограничений и упрощений. В случаях, когда на основе априорных сведений можно сделать предположение о совместном нормальном распределении параметров модели,

широко используется следующее предположение [8] об априорном распределении параметров модели:

$$\beta | \Sigma \sim N(\tilde{\beta}, \Sigma \otimes \tilde{\Omega}), \Sigma \sim iW(\tilde{\Sigma}, \alpha), \quad (10)$$

где  $\alpha > n + 1$  – гиперпараметр данного априорного предположения, характеризующий число степеней свободы обратного распределения Уишарта.

Распределение (10) можно записать в форме безусловного распределения для  $\beta$  следующим образом:

$$\beta \sim N(\tilde{\beta}, (\alpha - n - 1)^{-1} \tilde{\Sigma} \otimes \tilde{\Omega}), \quad (11)$$

где гиперпараметры  $\tilde{\beta}$ ,  $\tilde{\Omega}$  могут определяться на основе подходов, предложенных в [13].

Апостериорное распределение будет иметь вид [8]:

$$\beta | \Sigma, Y \sim N(\bar{\beta}, \Sigma \otimes \bar{\Omega}), \\ \Sigma | Y \sim iW(\bar{\Sigma}, T + \alpha), \quad (12)$$

где  $\bar{\Omega} = (\tilde{\Omega}^{-1} + X'X)^{-1}$ ,  $\bar{B} = \tilde{\Omega}(\tilde{\Omega}^{-1}\tilde{B} + X'X\hat{B})$ ,  $\bar{\Sigma} = \hat{B}'X'X\hat{B} + \tilde{B}\tilde{\Omega}^{-1}\tilde{B} + \tilde{\Sigma} + (Y - X\hat{B})'(Y - X\hat{B}) + \bar{B}'(\tilde{\Omega}^{-1} + X'X)\bar{B}$ ,  $\hat{B}$  – МНК-оценка параметров.

*Предположение, учитывающее ограничения, накладываемые на параметры VAR*

При оценивании параметров VAR зачастую известна структура взаимосвязей между переменными моделируемой системы. В данном случае введение ограничений на структуру VAR приводит к построению обоснованных с экономической точки зрения моделей и позволяет сократить число оцениваемых параметров, что также положительно сказывается на результатах моделирования.

Одним из подходов, позволяющим учесть предполагаемые ограничения, накладываемые на параметры VAR, можно назвать выбор параметров путем стохастического поиска (*Stochastic Search Variable Selection*), предложенный в [6]. Преимуществом данного подхода является возможность обоснованного с точки зрения экономической теории задания гиперпараметров, в качестве которых выступают ограничения, накладываемые на параметры модели. При этом с помощью подхода выбора параметров путем стохастического поиска возможен как выбор конкретного вида

ограничений на параметры, так и определение структуры ограничений на основе эмпирических данных в случаях, когда существует множество вариантов наложения ограничений на модель либо структура ограничений неизвестна.

Подход выбора параметров путем стохастического поиска заключается в итерационном процессе построения распределения гиперпараметров модели, позволяющих учесть накладываемые ограничения, и гиперпараметров априорных распределений оцениваемых параметров модели. Рассмотрим простейший случай предположения о совместном нормальном распределении параметров модели, в котором ограничения накладываются на гиперпараметры, определяющие средние значения априорного распределения.

Обозначим общее число оцениваемых параметров модели (4) как  $M = n(nk + 1)$  и представим оцениваемые параметры в форме вектора  $b = (b_1, b_2, \dots, b_M)'$  размерности  $M \times 1$ . Априорное предположение, позволяющее накладывать ограничения на оцениваемую модель, можно представить как:

$$b_j | \gamma_j \sim (1 - \gamma_j)N(0, \tau_{0j}^2) + \gamma_j N(0, \tau_{1j}^2), \quad (13)$$

где  $\gamma_j \in \{0, 1\}$  – переменные, которые равняются нулю для исключаемых ограничениями параметров; и единице для параметров, не затронутых ограничениями; а  $\tau_{0j}$ ,  $\tau_{1j}$  – заданные константы, такие, что  $\tau_{0j}^2 < \tau_{1j}^2$  и  $\tau_{0j}^2$  достаточно малы, чтобы ограниченные параметры можно было считать равными нулю.

В общем случае данного подхода переменные  $\gamma_j$  предполагаются неизвестными и оцениваются на основе данных. Таким образом, происходит идентификация ограничений, накладываемых на модель на основе эмпирических данных. При этом делается предположение, что элементы вектора  $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M)'$  – случайные величины Бернулли, распределенные независимо:

$$P(\gamma_j = 1) = q_j, P(\gamma_j = 0) = 1 - q_j, \quad (14)$$

где  $q_j \in (0, 1)$  – гиперпараметр, задающий вероятность включения в оцениваемую модель параметра  $j$ .

Априорное распределение (13) можно представить в сокращенной форме [6]:

$$b | \gamma \sim N(0, DD), \quad (15)$$

где  $D$  – диагональная матрица размерности  $(M \times M)$ , элементы  $d_{jj}$  которой определяются как:

$$d_{jj} = \begin{cases} \tau_{0j}, \gamma_j = 0 \\ \tau_{1j}, \gamma_j = 1 \end{cases}. \quad (16)$$

Апостериорное распределение параметров модели в подходе выбора параметров путем стохастического поиска строится на основе выборок случайных величин из данного распределения с помощью алгоритма Гиббса, включающего следующие шаги.

1. Строятся случайные величины на основе условных распределений, определенных в предположении о совместном нормальном распределении с учетом ограничений [6]:

$$b | Y, \gamma, \Sigma \sim N(\bar{b}, \bar{\Omega}), \\ \Sigma^{-1} \sim W(T + \alpha, \bar{\Sigma}), \quad (17)$$

где  $\bar{\Omega} = (\Sigma^{-1} \otimes (X'X) + (DD)^{-1})^{-1}$ ,  $\bar{b} = \bar{\Omega}((I_M \otimes XY) \text{vec}(\Sigma) + (DD)^{-1}b)$ ,  $\bar{\Sigma} = (\sum_{i=1}^T (Y_i - Z_i \hat{b})(Y_i - Z_i \hat{b}))^{-1}$ ,

$Z_i = I_M \otimes X_i$ ,  $\text{vec}(\Sigma)$  – представление матрицы  $\Sigma$  в векторной форме, при котором вектор-столбцы матрицы  $\Sigma$  записаны последовательно;

$I_M$  – диагональная единичная матрица размерности  $(M \times M)$ ;  $\hat{b}$  – МНК-оценка вектора параметров.

2. Строятся независимо распределенные случайные величины  $\gamma_j$  на основе условного распределения Бернулли:

$$P(\gamma_j = 1 | Y, b) = \bar{q}_j, \quad (18)$$

$$P(\gamma_j = 0 | Y, b) = 1 - \bar{q}_j,$$

где в общем случае  $\bar{q}_j$  определяется как:

$$\bar{q}_j = \frac{Q_{1j}}{Q_{1j} + Q_{0j}}, \\ Q_{0j} = \frac{1}{\tau_{1j}} \exp\left(-\frac{b_j^2}{2\tau_{0j}^2}\right) (1 - \hat{q}_j), \\ Q_{1j} = \frac{1}{\tau_{1j}} \exp\left(-\frac{b_j^2}{2\tau_{1j}^2}\right) \hat{q}_j, \quad (19)$$

где  $\hat{q}_j$  – оценка гиперпараметра, задающая вероятность включения в оцениваемую модель параметра  $j$ .

Первоначальные значения оценок гиперпараметров  $\hat{q}_j$  в случае, когда структура накладываемых ограничений неизвестна и требуется ее идентификация, могут быть определены равными

0,5, и в процессе итераций алгоритма Гиббса их значения будут переоценены. В случае, когда накладываются конкретные ограничения на структуру модели, предполагается, что  $\bar{q}_j \in \{0,1\}$  и их значения определяются исходя из априорных предположений относительно накладываемых ограничений.

Построенные с помощью алгоритма Гиббса выборки соответствуют апостериорному распределению параметров модели и используются для получения их выборочных оценок.

\* \* \*

(Продолжение следует.)

Материал поступил 26.01.2015.

#### Источники:

1. Bernanke, B. *Credit, Money, and Aggregate Demand* / B. Bernanke, A. Blinder // *American Economic Review*. – 1988. – № 78. – P. 435–439.
2. Bernanke, B. *Inside the Black Box: The Credit Channel of Monetary Policy Transmission* / B. Bernanke, M. Gertler // *Journal of Economic Perspectives*. – 1995. – № 9. – P. 27–48.
3. Cecchetti, S. *Legal Structure, Financial Structure and the Monetary Policy Transmission Mechanism* / S. Cecchetti // *National Bureau of Economic Research Working Paper*. – 1999. – № 7151. – P. 20.
4. Christiano, L. *Monetary Policy Shocks: What Have We Learned and to What End?* / L. Christiano, M. Eichenbaum, C. Evans // *Handbook of Macroeconomics*. – 1998. – P. 65–148.
5. Ganev, G. *Transmission Mechanism of Monetary Policy in Central and Eastern Europe* / G. Ganev, K. Molnar, K. Rubinski, P. Wozniak // *Centre for Social and Economic Research Case Reports*. – 2002. – № 52. – P. 40.
6. George, E. *Bayesian Stochastic Search for VAR Model Restrictions* / E. George, D. Sun, S. Ni // *Journal of Econometrics*. – 2008. – № 142. – P. 553–580.
7. Giannone, D. *Prior Selection for Vector Autoregressions* / D. Giannone, M. Lenza, G. Primiceri // *NBER Working Paper*. – 2012. – № 18467. – P. 39.
8. Gigineishvili, K. *Pass-Through from Exchange Rate to Inflation: Monetary Transmission in Georgia* / K. Gigineishvili // *Economic Series, the Georgian Academy of Science*. – 2002. – № 10. – P. 214–232.
9. Golinelli, R. *Monetary Policy Transmission, Interest Rate Rules and Inflation Targeting in Three Transition Countries* / [Electronic resource] / R. Golinelli, R. Rovelli // *University of Bologna*. – Mode of access: Available at <http://amsacta.cib.unibo.it/archive/00000656/>. – Date of access: 17.10.2005.
10. Ireland, P. *The Monetary Transmission Mechanism* / P. Ireland // *FRB Boston Working Paper*. – 2005. – № 6/1. – P. 13.
11. Jeffreys, H. *Scientific Inference* / H. Jeffreys // *Cambridge University Press*. – 1957. – P. 236.
12. Juks, R. *Monetary policy transmission mechanisms: a theoretical and empirical overview* / [Electronic resource] / R. Juks // *The Monetary Transmission Mechanism in the Baltic States*. Mode of access: [http://eestipank.info/pub/en/dokumentid/publikatsioonid/seeriad/muud\\_uuringud/\\_2004/\\_2.pdf?objId=533623](http://eestipank.info/pub/en/dokumentid/publikatsioonid/seeriad/muud_uuringud/_2004/_2.pdf?objId=533623). – Date of access: 17.10.2005.
13. Kadiyala, K. *Numerical methods for estimation and inference in bayesian var-models* / K. Kadiyala, S. Karlsson // *Journal of Applied Econometrics*. – 1997. – № 12. – P. 99–132.
14. Kujis, L. *Monetary Policy Transmission Mechanism and Inflation in the Slovak Republic* / L. Kujis // *IMF Working Paper*. – 2002. – № 02/80. – P. 27.
15. Litterman, R. *A Bayesian procedure for forecasting with vector autoregressions* / R. Litterman // *Massachusetts Institute of Technology Working Paper*. – 1980. – P. 20.
16. Lopes, F. *The transmission mechanism of monetary policy in a stabilizing economy: notes on the case of Brazil* / F. Lopes // *BIS policy paper*. – 1998. – № 3. – P. 65–73.
17. Mishkin, F. *The Transmission Mechanism and the Role of Asset Prices in Monetary Policy* / F. Mishkin // *National Bureau of Economic Research Working Paper*. – 2001. – № 6817. – P. 23.
18. Mishkin, F. *The Channels of Monetary Transmission: Lessons for Monetary Policy* / F. Mishkin // *Banque de France: Bulletin, Digest*. – 1996. – № 27. – P. 33–44.
19. Nicolo, G. *Financial Development in the CIS-7 Countries* / G. Nicolo, S. Geadah, D. Rozhkov // *IMF Working Papers*. – 2003. – № 3/205. – P. 20.
20. *The transmission mechanism of monetary policy* // *Bank of England Monetary Policy Committee*. – 1999. – P. 12.
21. Комков, В. Особенности денежной трансмиссии в белорусской экономике / В. Комков // *Банкаўскі веснік*. – 2006. – № 26(355). – С. 28–31.