

УДК 303.732.4; 519.816; 519.23; 004.023

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ В ЦИКЛЕ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ

З.К. Авдеева

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: zinaida.avdeeva@gmail.com

Е.А. Гребенюк

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: lngrebenuk12@yandex.ru

С.В. Коврига

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: kovriga@ipu.ru

Ключевые слова: производственная система, целевые показатели, прогнозирование, когнитивная карта, временные ряды, мониторинг.

Аннотация: Предложен комбинированный подход к прогнозированию целевых показателей производственной системы в зависимости от ключевых факторов, определяющих функционирование этой системы, и факторов влияния внешней среды. Подход сочетает применение методов на основе когнитивных карт, методов анализа нестационарных временных рядов и мониторинг разнородных информационных источников.

1. Введение

Важнейшей функцией стратегического управления функционированием и развитием производственной системы (ПС) является достижение стратегических целей развития ПС в условиях изменяющейся внешней среды. Внешняя среда определяется факторами, которые находятся за пределами ПС и формируют условия ее функционирования. В зависимости от характеристик факторов воздействия различают ближнюю внешнюю среду (бизнес-среда) и дальнюю (макросреда). Бизнес-среда включает факторы, которые непосредственно влияют на ПС и сами испытывают на себе ее влияние; макросреда – факторы косвенного влияния на ПС. Задачи стратегического управления в современных ситуациях существенно усложнились. Изменения структуры и характера взаимодействий во внешней среде предъявляют новые требования к анализу ситуаций вследствие необходимости учета взаимодействия факторов различной природы; неопределенности и неоднородности информации о ситуации; отсутствия достоверной инфор-

мации о значимых факторах; проблемы обоснованного выбора факторов и их взаимосвязей из числа выявляемых современными инструментами больших данных.

Одним из основных элементов стратегического управления является прогнозирование целевых показателей. В данной работе рассматривается задача прогнозирования, в которой динамика изменений целевого показателя и влияющих на него факторов, определяющих функционирование ПС, и факторов внешней среды описывается временными рядами. При решении данной задачи в современных ситуациях процесс прогнозирования должен учитывать изменения направлений воздействия факторов прогнозной модели и состава факторов и характера их влияния на целевой показатель. Поэтому в процессе прогнозирования необходим мониторинг (i) прогнозируемого целевого показателя, (ii) факторов, используемых для его прогноза, (iii) неиспользуемых в данный момент факторов, которые могут служить источниками слабых сигналов, для обнаружения изменений трендов целевого индикатора и факторов, влияющих на него. Здесь слабые сигналы – это факторы-предвестники значимых событий во внешней среде, которые могут стать причиной изменений целевых показателей в будущем.

В докладе предлагается комбинированный подход к прогнозированию целевых показателей ПС с учетом ключевых факторов, определяющих функционирование этой системы, и факторов влияния внешней среды. Подход включает:

- выявление ключевых факторов и слабых сигналов посредством анализа модели функционирования ПС во внешней среде, представленной когнитивной картой ситуации (ККС);
- анализ динамики факторов и целевых показателей и построение прогнозной модели M^{forecast} методами анализа временных рядов,
- мониторинг информационного пространства с целью обнаружения изменений тенденций и состава показателей модели M^{forecast} ;
- коррекцию M^{forecast} и ККС по результатам обнаруженных изменений.

Процедура прогнозирования включает два основных этапа.

Этап 1. Построение M^{forecast} по историческим данным на основе рекомендаций когнитивного моделирования ситуации, включая выявление ключевых факторов, определяющих функционирование ПС, и факторов внешней среды посредством анализа ККС; выбор факторов из числа рекомендованных в результате анализа и построение M^{forecast} на основе анализа временных рядов; апробацию M^{forecast} на исторических данных.

Включение когнитивного моделирования ситуации в процедуру прогнозирования дает углубленное понимание ситуации в целях организации направленного поиска и сбора наборов данных для построения M^{forecast} на этапе мониторинга.

Этап 2. Формирование и коррекция прогноза в режиме получения текущих наблюдений, включая:

- вычисление прогноза на будущий период;
- мониторинг значений целевого показателя, факторов, включенных в модель M^{forecast} ;
- обнаружение изменений тенденций временных рядов, включенных в модель M^{forecast} , в режиме получения текущих наблюдений;
- выявление в процессе прогнозирования возможных ранних признаков значимых событий из внешней среды, которые могут стать причиной изменений в текущем поведении ПС и, в частности, в построенном на долгосрочный период прогнозе целевого показателя; внесение изменений в ККС;
- распознавание характера этих событий и в зависимости от обнаруженных опасностей или возможностей, коррекция прогноза и формирование вариантов прогнозов для различных сценариев дальнейшего развития событий; анализ необходимости корректировки прогнозной модели M^{forecast} .

2. Выявление ключевых факторов влияния на ККС

В основе построения модели функционирования ПС лежит ККС – формализованная модель ситуации в виде причинно-следственных влияний между значимыми факторами-переменными. Эта модель отражает обобщенное представление о функционировании ПС во внешней среде на основе интеграции знаний разнопрофильных экспертов. ККС может быть результатом непосредственной работы с экспертами (прямой способ построения) и/или на основе обработки вторичных источников по результатам мониторинга информационного пространства (косвенный способ построения). В ККС каждый зависимый фактор-переменная y определяется формулой

$$(1) \quad \Delta y^{t+1} = \sum_{x \in X_y} w_{x \rightarrow y} \cdot \Delta x^t \quad \text{или} \quad y^{t+1} = y^t + \sum_{x \in X_y} w_{x \rightarrow y} \cdot (x^t - x^{t-1}),$$

где x^t, y^t – уровень активности x, y в момент времени t , $w_{x \rightarrow y}$ – вес влияния x на y , отражающий степень причинности изменения активности y от изменения активности x , X_y – множество факторов прямого влияния на y .

В случае внешнего воздействия на зависимый фактор при $t = 0$ к формуле (1) добавляется слагаемое $g^{t=0} : \sum_{x \in X_y} w_{x \rightarrow y} \cdot \Delta x^{t=0} + g^{t=0}$, а далее с $t > 0$ (1) остается прежней. Если

$Q^t = E_N + W + \dots + W^t$ & $Q = \lim_{t \rightarrow \infty} Q^t = (E_N - W)^{-1}$, то справедливо $X^{t+1} = Q^{t+1} X^0 + Q^t G^0$, где Q является матрицей интегральных влияний факторов, элементы которой характеризуют все прямые и косвенные влияния между факторами ККС. (Полное описание модели представлено в [1]).

Выявление ключевых факторов влияния на целевые показатели ПС опирается на анализ структурных свойств модели функционирования ПС [1]. В ККС целевым параметрам ПС соответствуют целые факторы карты. Цель анализа – оценить чувствительность целевого показателя к изменениям того или иного фактора ПС или внешней среды, и как будет направлено данное изменение. Анализ включает определение интегрального влияния текущей активности факторов на желаемую направленность активности целевых факторов X^{goal} (с использованием матрицы Q); выявление характера (положительного или отрицательного) и веса совокупного влияния какого-либо фактора на благоприятную активность X^{goal} ; оценку эффективности влияния благоприятных и негативных факторов на отдельные и/или все X^{goal} для ранжирования факторов при формировании набора ключевых факторов, рекомендуемых для построения $M^{forecast}$.

Анализ ККС не сводится только к выявлению ключевых факторов; на ней можно проанализировать окружение, связанное с любым выделенным ключевым фактором. Это полезно в тех случаях, когда отсутствуют наборы данных по такому фактору. Тогда мониторинг осуществляется по его окружению для сбора данных при построении $M^{forecast}$. Также ККС может нести объяснительную функцию, когда в ходе мониторинга выявлены наборы данных, образующие временные ряды с эффектами, требующими объяснения. В этом случае проводится анализ ККС с учетом параметров этих временных рядов. Возможна предварительная коррекция ККС, если в нее не включены факторы-переменные, соотносимые с параметрами временных рядов. Наконец, на основе ККС возможно формирование качественного прогноза типа «что будет, если» методом имитационного моделирования, который показывает, в каком направлении будет изменяться активность целевых факторов ККС в зависимости от текущей активности любого выбранного набора факторов в ККС. Такие прогнозы полезны в случае, когда $M^{forecast}$ не пригодна для решения поставленной задачи прогнозирования целевых показателей.

3. Построение прогнозной модели, формирование и коррекция прогноза

Построение прогнозной модели. Пусть в результате отбора факторов, оказывающих влияние на целевой показатель Y , представляющий собой цену на конечный продукт, по ККС выбраны факторы $X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_k$, которые влияют на формирование цены. Построим прогнозную модель M^{forecast} , в которую в зависимости от результатов анализа, могут быть включены значения показателя Y и тех факторов, которые оказывают на него наиболее значительное влияние при адекватно выбранных запаздываниях.

Среди факторов $\{X_i, i = 1, 2, \dots, k\}$ могут присутствовать факторы, описываемые как стационарными, так и нестационарными временными рядами. Нестационарные ряды можно разделить на 2 класса: ряды, стационарные относительно детерминированного тренда или тренд-стационарные и ряды разностно-стационарные¹. Последние называют еще «рядами интегрированными порядка m », $I(m)$, где m – число разностей, необходимое для преобразования ряда к стационарному. Порядок стационарных рядов и тренд-стационарных рядов равен 0, а сами ряды называются «интегрированными порядка 0», $I(0)$. Большинство макроэкономических и финансовых показателей описывается рядами, интегрированными первого порядка, $I(1)$, хотя отдельные ряды могут иметь тип нестационарности $I(0)$ или $I(2)$. Известно [2], что методы анализа и обработки стационарных временных рядов, могут проводить к ошибочным результатам, если их использовать для работы с рядами, порядок интеграции которых больше нуля.

Если целевой показатель имеет порядок интегрированности $I(0)$, то для прогноза его значений могут быть использованы только факторы, описываемые рядами порядка $I(0)$. При включении в модель M^{forecast} рядов порядка $I(1)$ используются не исходные значения факторов, а их разности.

Если целевой показатель и все отобранные факторы имеют порядок $I(1)$, то между ними могут существовать либо ложная регрессия, либо коинтеграция, и в модель могут быть включены только те факторы X_{i_1}, \dots, X_{i_p} , для которых соответствующие тесты показали наличие коинтеграции между рядами $X_{i_1}, \dots, X_{i_p}, Y$.

Следующим шагом процедуры выбора фактора для модели является проверка пригодности каждого фактора X_i (или его разности) для прогнозирования значения Y в следующий момент времени t . Если модель включает ряды $I(0)$ и ряды разностей рядов порядка $I(1)$, тестирование выполняется с помощью теста причинности по Грейнджеру. Если все ряды, включенные в модель, являются рядами порядка $I(1)$ и коинтегрированными, то для проверки причинности используется тест MWALD, предложенный [3]. Факторы, отобранные после выполнения первого и второго шага, используются для построения M^{forecast} . Выбор типа и построение модели выполняются методами временных рядов на основе анализа взаимосвязей имеющегося набора факторов и диагностики построенных вариантов, включая апробацию модели на контрольных выборках.

Формирование и коррекция прогноза в режиме получения новых наблюдений. В режиме формирования текущих прогнозов по построенной модели необходимо проведение мониторинга значений целевого показателя и факторов, включенных в M^{forecast} с целью обнаружения: 1) неявных, скрытых изменений уровня и волатильности, и воз-

¹ Ряд является разностно-стационарным, если после взятия разностей он становится стационарным.

никновения трендов в отдельных рядах; 2) изменений характера связей между рядами, включенными в прогнозную модель. Изменения типа (1) далеко не всегда могут быть своевременно обнаружены визуально, вследствие наличия шумов. Обнаружение выполняется методами последовательного анализа, в случае наличия сильных возмущений применяется фильтрация. Большинство изменений типа (2) сводится к изменениям корреляционных связей для рядов типа $I(0)$, и к нарушению коинтеграции. Если прогнозная модель построена из рядов $I(1)$, то при нарушении коинтеграции связь между рядами нарушается, и регрессия становится ложной. На рис. 1 показано нарушение коинтеграции между ценами на внешнем и внутреннем рынках; жирной стрелкой обозначен момент нарушения коинтеграции; в нижней части рисунка – график разности между коинтеграционной регрессией и ценой на внешнем рынке. Алгоритм обнаружения нарушения коинтеграции в режиме получения наблюдений предложен в [4].

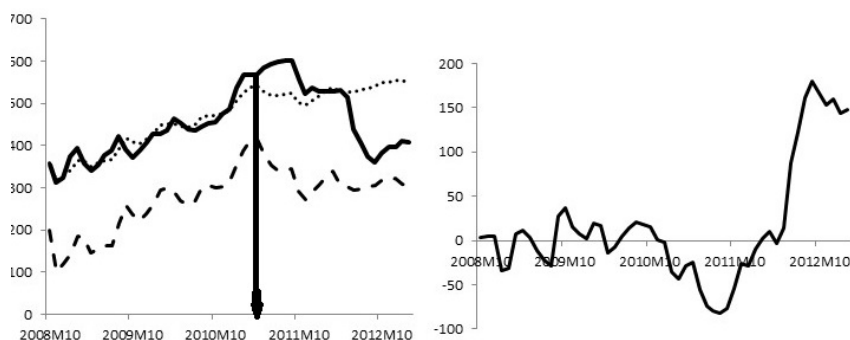


Рис. 1. Нарушение коинтеграции между ценами: внешний рынок (—), внутренний рынок (---), коинтеграционная регрессия (···).

4. Заключение

Предложенный комбинированный подход к прогнозированию целевых показателей ПС позволит в неопределенных условиях ее функционирования комплексно и систематическим образом отслеживать значимые изменения в ситуации и выработать более гибкую стратегию развития ПС в бизнес- и макросреде, повысить обоснованность управленческих решений. Эффективность предложенного подхода проверена на задаче формирования закупочных цен на черный металлолом металлургическими комбинатами на вторичном рынке сырья. В рамках развития подхода планируется разработка программных средств поддержки решения задачи прогнозирования целевых показателей ПС с учетом ролевого участия различных специалистов в этом процессе.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 18-07-01044а.

Список литературы

1. Avdeeva Z., Kovriga S., Makarenko D. On the statement of a system development control problem with use of SWOT-analysis on the cognitive model of a situation // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, No. 12. P. 1838-1843.
2. Engle R.F. and Granger C.W.J. Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. University of Nottingham, Nottingham NG7 ZRD. 1987.
3. Dolado J.J and Luetkepohl H. Making wald tests work for cointegrated VAR systems // Journal Econometric Reviews. 1996. Vol. 15, No. 4. P. 369-396.
4. Гребенюк Е.А. Обнаружение изменений свойств нестационарных случайных процессов // Автоматика и телемеханика. 2003. № 12. С. 44-59.