

Раздел 5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ В ЭКОНОМИКЕ

УДК 338.242.2

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ГОТОВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ К ВНЕДРЕНИЮ ИННОВАЦИЙ

Коровин Дмитрий Игоревич (dmitriyikorovin@list.ru)

Топчий Павел Павлович

ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

Статья написана по результатам выполнения темы НИР 2018 год «Индустрия 4.0: исследование влияния развития передовых производственных технологий на производительность российских промышленных компаний»

Работа посвящена методу создания экспертной системы. Целью системы является производство экспресс-выводов по готовности предприятия к внедрению инноваций, относящихся к Индустрии 4.0. Экспертная система основывается на модели нечеткой логики. Логические основы этой модели, её аргументы определены ранее в рамках предварительной работы. Выводы предполагают создание рекомендаций по активизации деятельности той функциональной подсистемы предприятия, развитие которой предоставит более высокий результат внедрения инноваций.

Ключевые слова: экспертная модель, искусственный интеллект, нечеткая логика, внедрение инноваций, Индустрия 4.0, принятие решения.

Введение

При проведении крупных экономических исследований часто используют методы изучения зависимостей между факторами процесса, основанные на построении пробит или логит-моделей. В ходе крупного исследования влияния развития передовых производственных технологий на производительность российских промышленных компаний, которое проводилось в Финансовом Университете при Правительстве Российской Федерации в 2018 году, были построены бинарные модели для решения задач определения факторов, влияющих на эффективность внедрения инноваций Индустрии 4.0 («Индустрия 4.0» или четвертая промышленная революция определяется как средство повышения конкурентоспособности обрабатывающей промышленности, быта и досуга граждан через усиленную интеграцию «киберфизических систем», или CPS, в заводские процессы и жизнь человека). В рамках этого исследования, охватившего существенный объем статистических данных, также проводился опрос менеджеров крупных российских компаний, позволяющий получить оценку успешности внедрения технологий Индустрии 4.0 при достижении тех или иных условий.

На аналитическом этапе возникла следующая задача. При определенных наборах существенных факторов влияющих на успешность внедрения высокотехнологичных инноваций необходимо создать экспертную модель, которая бы указывала на готовность конкретной производственной инфраструктуры (финансовой, технологической, кадровой и т.д.) к внедрению таких инноваций. Более того, экспертная система должна производить оценку готовности к внедрению подсистем (их набор определен в ходе предшествующего исследования с помощью эконометрических бинарных моде-

лей) и создавать соответствующие рекомендации.

Нами была построена экспертная модель, которая обобщила результаты пробит - моделей и выводы опросов, которая при указании показателей рассчитывала оценку успешности тех или иных будущих инноваций. Основаниями для вывода являлись тенденции, определяющие (по заключению модели) успешность возможных инвестиций в развитие технологий Индустрия 4.0 в российской практике. Таким образом, после указания параметров исследуемого предприятия, лицо принимающее решение получало оценку успешности внедрения технологий Индустрия 4.0 [4, с. 84]. Это значит, что при существующих условиях многократные попытки внедрения инноваций на таких же копиях предприятий в среднем дали указанный экспертный результат (в соответствии с эконометрической моделью). Более того, ЛПР получит рекомендации по активизации того или иного функционала его производственной деятельности [3], которое в дальнейшем должно привести к успеху.

Модель строится на основании нечетко-логического вывода [2]. Это значит, что в модели закладываются логические правила, построенные исключительно на выводах пробит-модели (эти правила в нечеткой логики называются базой знаний). Выводы производятся с использованием правила Мамдани. Функции принадлежности построены таким образом, чтобы на обучающей последовательности известных внедрений технологий Индустрия 4.0 на российских предприятиях результаты соответствовали действительности (Для этого была решена оптимизационная задача на пространстве высокой размерности).

Указанная модель являлась двухуровневой. На первом уровне (подготовительном) были

построены нечетко-логические функции для каждой подсистемы предприятия, значения которых определяли с одной стороны готовность подсистем к внедрению различных типов инноваций, с другой стороны являлись аргументами функции, построенной также нечетко-логическим образом, значение которой указывало на готовность внедрения инноваций на предприятии. Эта нечетко-логическая процедура реализовывалась на втором уровне.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Всякую нечетко-логическую модель можно представить как функцию $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, аргументы которой x_1, x_2, \dots, x_n есть значения наблюдаемых параметров, а значение Y – результат изучаемой величины. В отличие от классического аппарата нельзя записать аналитическое выражение такой функции. Функциональные процедуры или алгоритм вычисления значений функции основан на так называемой базе знаний, функциях принадлежности и процедурах фаззификации и дефаззификации. База знаний, или набор правил формальной логики, определяет сущность процесса, логически связывая условия с помощью конструкций типа «если А и одновременно В, то С», «если D или F, то G». Такая база строится исходя из предварительных знаний о природе экономики, нормативных положений, которые лежат в основе экономических, технологических или хозяйственных процессов. Функции принадлежности определяют, насколько «достоверны» высказывания, используемые в базе знаний, при текущих значениях наблюдаемых величин x_1, x_2, \dots, x_n . В отличие от классической логики «степень достоверности» может изменяться от 0 до 1. Процедуры фаззификации и дефаззификации сводятся к реализации математических преобразований. Они используют логические правила и функции принадлежности для получения алгоритма, который наборам x_1, x_2, \dots, x_n присваивает ожидаемое значение Y . Для этого используются известные наборы (обучающая выборка). При неизменности базы знаний достичь необходимой близости реализуемых с помощью нашего алгоритма значений и необходимых известных Y можно за счет параметризации функций принадлежности. Таким образом, построенная функция в соответствии с базой знаний будет на известных наборах выдавать ожидаемый результат. Следует ожидать, что при изменении исходных величин результат будет соответствовать вычисленным значениям, которые не противоречат заложенным логическим правилам.

Модель экспертной системы (ЭС) представляет собой двухуровневую модель, выводы в которой производятся на основании методов нечеткой логики. Выделим подготовительный и основной уровни. На основном уровне ЭС обрабатываются результаты опроса пользователя

на подготовительном уровне. Для получения выводов о готовности объекта к реализации технологий Индустрия 4.0. используются логические правила, составленные в соответствии с результатами анализа, проведенного по пробит-модели. Были выделены четыре группы факторов, оценки влияния которых в указанной модели оказались наиболее значимы на результат качество инвестирования в технологии Индустрия 4.0.. Были выделены категории (подсистемы): Финансово-экономическая, Мотивационная, Кадровая и Технологическая. В нашей экспертной модели, пользователю предлагается определить оценки факторов, которые впоследствии в соответствии с логическими правилами будут преобразованы в оценку категории факторов (подготовительный уровень). Далее оценки категорий в соответствии с логическими правилами на основном уровне преобразуются в выводы-рекомендации, суть которых представлена в пяти видах результатов. Определим эти виды так:

S1. Компания не готова к внедрению технологий Индустрии 4.0.

S2. Компания может достичь успеха при заимствовании частичных технологий в продуктовой и процессной сферах

S3. Компания может достичь успеха при заимствовании частичных технологий в маркетинговой и организационной сферах

S4. Компания может достичь успеха при разработке и внедрении технологий в продуктовой и процессной сферах

S5. Компания может достичь успеха при разработке и внедрении технологий во всех сферах. Внедрение рекомендовано.

Подготовительный этап

На подготовительном этапе пользователю предлагается предоставить данные о деятельности объекта, состоянии его финансовой системы, уровне технологий, кадровой вооруженности и мотивационных аспектах его менеджмента. Данные, получаемые экспертной системы, как это уже указывалось, разбиты на четыре блока. Приведем список запросов, предлагаемый пользователю. Этот список сформирован на основании набора существенных экзогенных переменных пробит-модели.

Финансовый блок

Величина, характеризующая готовность финансовой системы обозначена нами как F. Величина F является результатом нечеткого вывода, основанного на следующих факторах.

Показатель долгосрочной финансовой устойчивости. (KF) В качестве этого показателя выбирается коэффициент финансовой устойчивости равный отношению собственного капитала и долгосрочных обязательств к валюте баланса. Исходными данными для расчета

служит бухгалтерский баланс за предыдущий год¹.

Возможность привлечения инвестиционных средств посредством участия в государственных программах SF (элемент государственной поддержки или стратегическое положение на рынке продукции. Представляет собой объем оплаты товаров и услуг из средств федерального или муниципальных бюджетов или получение долгосрочных инвестиций на перевооружение по государственным программам в случае собственника государства). Показатель выбирается, как отношение величины полученных таким образом средств в среднем за пять последних лет к величине среднего значения собственного капитала за последние пять лет.

Возможность получения долгосрочного кредита LF (Максимальное из возможных значений полученных кредитов сроком более года к величине среднего значения собственного капитала за последние три года)

EF - темп роста выручки за отгруженную продукцию и предоставленные услуги, усредненный за три года

Оценка ликвидности. Коэффициент текущей ликвидности² QF.

Инвестиционная привлекательность – IF, актуально в условиях санкций. Отношение объема привлеченных инвестиционных средств к величине среднего значения собственного капитала за последние пять лет.

Сама величина F описывается тремя термами, суть которых разные градации готовности финансовой системы. Все факторы также представляются тремя термами-градациями.

¹ Если величина коэффициента финансовой устойчивости колеблется в пределах 0.8–0.9 и есть тенденция к росту, то финансовое положение организации устойчиво. Рекомендуемое же значение не менее 0.75. Если значение ниже рекомендуемого, это ставит под сомнение устойчивость компании.

² Коэффициент покрытия (англ. *Current ratio, CR*) — финансовый коэффициент, равный отношению текущих (оборотных) активов к краткосрочным обязательствам (текущим пассивам). Источником данных служит бухгалтерский баланс компании.

Ктл = (ОА—ЗУ)/КО, где: **Ктл** — коэффициент текущей ликвидности; **ОА** — оборотные активы; **ЗУ** — задолженность учредителей по взносам в уставный капитал; **КО** — краткосрочные обязательства. Коэффициент отражает способность компании погашать текущие (краткосрочные) обязательства за счёт только оборотных активов. Чем показатель больше, тем лучше платёжеспособность предприятия. Принимая во внимание степень ликвидности активов, можно предположить, что не все активы можно реализовать в срочном порядке. Нормальным считается значение коэффициента от 1.5 до 2.5, в зависимости от отрасли. Значение ниже 1 говорит о высоком финансовом риске, связанном с тем, что предприятие не в состоянии стабильно оплачивать текущие счета. Значение более 3 может свидетельствовать о нерациональной структуре капитала.

Организационно-технологический блок

Величина T (три градации), которая указывает готовность организационной и технологической подсистем предприятия к реализации внедрения технологий Индустрия 4.0. Величина T является результатом нечеткого вывода, основанного на следующих факторах

Принадлежность группе (g) - высоко технологичной (g=1), средне технологичной (g=2) и низко технологичной отрасли (g=3) (соответствие по ОКВЭД). Величина детерминированная, нечетким характером не наделена. В модели является «переключателем».

Размер предприятия (r) - малое (численность до 100 человек) (r=1), среднее (численность от 101 до 250) (r=2), крупное предприятие (более 250) (r=3). Пользователь может изменить градацию по численности сотрудников, применив особенности отрасли, в которой функционирует предприятие. Величина r — «переключатель».

Работа на внешнем рынке - OT Градации: OT1- нет экспортной продукции, нет контактов с возможными иностранными поставщиками технологий и оборудования. Терм OT2- предприятие реализует продукцию эпизодически на внешнем рынке, контакты с возможными иностранными поставщиками технологий и оборудования по необходимости. Терм OT3- предприятие реализует продукцию на внешнем рынке, контактирует с возможными иностранными поставщиками технологий и оборудования.

Получение прибыли от продаж нового продукта - PT. Три градации (по возрастанию).

Расходы на новые технологии и в инновационные продукты СТ. Градации по возрастанию СТ1, СТ2, СТ3.

Контакты и сотрудничество – КТ. Определяется интенсивностью контактов в сфере внедрения инноваций (КТ1, КТ2, КТ3).

Группы контактов, переменная m, значения 1,2,3,4 (не является нечеткой переменной). Величина m «переключатель»: m=1 - преимущественно с другими предприятиями отрасли; m=2 - преимущественно с университетами (ВУ-Замами); m=3 - преимущественно с консалтинговыми агентствами; m=4 - преимущественно научными организациями.

Мотивационный блок

Величина M, которая отвечает за факторы, определяющие необходимость обращения к технологиям Индустрия 4.0. Величина M является результатом нечеткого вывода, основанного на следующих факторах.

PM - экспертная оценка возможности достичь необходимого конкурентного свойства продукции (производства) с использованием технологий Индустрия 4.0. Градации PM1, PM2, PM3.

SM - оценка успешности внедрения технологий Индустрия 4.0 или её элементов. в соот-

ветствующей производственной сфере.. Описывается с помощью трех термов.

ОМ - ориентация собственников (топ менеджмента) на достижение стратегических целей, предполагающих невозможность роста без внедрения новых технологий. Градации варьируются от отсутствия возможности применения технологий (ОМ1) до ситуации, в которой собственник не представляет себе дальнейшее функционирование предприятия без внедрения технологий Индустрии 4.0. (ОМ3).

РМ - внешнее давление на собственников предприятия. РМ1 –нет давления, РМ2 – присутствует давление, влияющие на рынок сбыта, РМ3 - на предприятия давят условия соответствия необходимым технологическим требованиям, выдвигаемые государственными структурами.

Кадровый блок.

Величина К (К1, К2, К3), которая указывает готовность кадровой подсистемы предприятия к реализации внедрения технологий Индустрия 4.0. Величина К является результатом нечеткого вывода, основанного на следующих факторах.

Наличие в структуре предприятия полноценной ИТ-службы, которая успешно внедряет информационные технологии и её оценка (SK). Градации SK1 – служба не предусмотрена, SK2 –служба предусмотрена и имеет существенный потенциал её роста, SK3 – служба активно и успешно внедряет новые ИТ технологии.

Наличие на предприятии специалистов, способных быстро освоить новые информационные технологии ТК. Градации по возрасту ТК1, ТК2 и ТК3.

Уровень заработной платы на предприятии и возможности её увеличения - WK. Градации:WK1 – поднятие уровня ЗП для приглашения специалистов невозможно;WK2 – предприятие может изыскать резервы для оплаты приглашенных специалистов; WK3 – уровень ЗП в компании конкурентен в сфере компетентных специалистов.

Наличие в составе предприятия научно-исследовательских подразделений RK. RK1 – подразделения отсутствуют, RK2 – подразделения имеются, но их деятельность сконцентрирована на решении текущих производственных задач, RK3 – подразделения имеются и успешно работают.

Образовательная деятельность в компании –УК. УК1 – система переподготовки отсутствует, УК2 – предприятие поддерживает стремление сотрудников к повышению квалификации, УК3 – предприятие определяет порядок повышения квалификации, сотрудничает с центрами повышения квалификации или на предприятии имеются соответствующие службы.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА

Для реализации модели необходимо построение логических правил определяющих базу знаний. Эти логические правила, с одной стороны, строятся на основании выводов, рассмотренной пробит-модели, с другой стороны определяют механизм получения вывода экспертной модели. Таким образом, исключается субъективизм присущий эксперту-человеку.

Аргументами логических правил выступают термы (градации), которые являются множествами значений лингвистических переменных (KF, SF, LF, EF, QF, IF, OT, PT, KT, CT, PM, SM, OM, PM, SK, TK, WK, RK, UK). Каждая лингвистическая переменная имеет область определения величины, которая в нашем случае является значением экспертной оценки, выставленной как оценка для каждой лингвистической переменной. Например, для переменной OT - Работа на внешнем рынке, эксперт устанавливает оценку 6, так как предприятие начинает реализовывать продукцию на внешнем рынке, установив контакты с иностранными поставщиками технологий и оборудования. По мнению эксперта – оценка должна быть выше, чем оценка 5 (изначально рекомендованной, как достоверно относящаяся к OT2), но ниже оценки, достоверной свойству терма OT3. Далее, определив все численные оценки экспертов, устанавливаются степени достоверности свойств термов этим оценкам. Это производится с помощью функций принадлежности $\mu(x)$. Функции принадлежности выбираются из множества треугольных функций, задаваемых тремя параметрами a, b, c:

$$\mu(x)=\text{МИН}(\text{МАКС}(0;(x-a)/(b-a)); \text{МАКС}(0;(x-c)/(b-c))).$$

Подставляя оценку вместо переменной x, получаем значение уровня, соответствующего достоверности терма. Логические правила, используемые нами - это процедуры импликации, конъюнкций термов. Таким образом, следствием в импликации выступает величина, соответствующая степени готовности или финансовой системы или организационно-технологической системы или кадровой системы или системы мотиваций. То есть, логические конструкции

Если A и одновременно B ... и одновременно C, то D.

В алгоритме Мамдани в таком случае среди уровней, соответствующих A, B, ..., C, выбираются минимальный и график функции принадлежности терма D урезается на этом минимальном уровне. Все урезанные функции принадлежности для всех логических правил накладываются друг на друга, находится центр тяжести получившейся фигуры. Абсцисса цен-

тра тяжести является значением, которое мы объявляем промежуточной оценкой качества системы (готовность финансовой системы или организационно-технологической системы или кадровой системы или системы мотиваций) Это процедура называется дефаззификацией. Далее процедуры повторяются. В качестве термов выбираются величины F1, F2, F3, O1, O2, O3, K1, K2, K3, M1, M2, M3. Экзогенная лингвистическая переменная (результат моделирования) "Готовность предприятия к внедрению технологической Индустрия 4.0" представляется терминами S1, S2, S3, S4, S5.

Рекомендация формируется по принципу выбора того термина, значение функции принадлежности которого является самым большим.

Качество модели настраивается путем решения оптимизационной задачи. На основании опроса, проведенного среди менеджеров компаний, были построены обучающие выборки (51 выборка, соответствующая свершившимся событиям, и более 120 выборок, соответствующие ожиданиям менеджеров в случае предложенных им условий.) Параметры функций принадлежности объявляются аргументами функций расстояний D_j между значениями обучающей i -ой выборки и значением, полученном при применении алгоритма модели на одних и тех же значениях $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni})$. Строятся пять

функций расстояний для определения вида функций принадлежности: для финансово-экономической ($j=1$), мотивационной ($j=2$), кадровой ($j=3$), технолого-организационной ($j=4$) подсистем и основного уровня ($j=5$):

$$D_j = \sum_{i=1}^M (f_{a_j}(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) - Y_i)^2 \rightarrow \min$$

Здесь a_j - набор параметров функций принадлежности, используемых в выводах соответствующих подсистем. Для вычисления параметров применялись численные методы оптимизации – метод сопряженных градиентов.

Таким образом, представленная модель является моделью искусственного интеллекта.

БАЗА ЗНАНИЙ

База знаний строилась в соответствии с результатами предшествующего эконометрического исследования. Были выбраны 109 правил на первом этапе и 22 правила на основном этапе.

Модель была реализована в MS Excel, все правила реализовывались с помощью таблиц [1].

Например, запись

KF	KF	KF	SF	SF	SF	LF	LF	LF	EF	EF	EF	Q	Q	QF	IF	IF	IF	F ₁	F ₂	F ₃
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1			1						1			1						1		

будет означать

$$KF1 \& SF1 \& EF1 \& QF1 \rightarrow F1$$

Если KF1 и одновременно SF1 и одновременно EF1 и одновременно QF1, то F1.

Были построены 5 таблиц баз знаний.

Подобный способ задания правил путем расстановки в ячейки символов единиц оказался удобным для проектирования правила Мамдани с помощью электронных таблиц.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МАМДАНИ

Для реализации метода Мамдани каждой таблице базы знаний сопоставлялась таблица вычисления уровней. В каждой строке такой таблицы (соответствующей правилу) в столбцах, в которых возникала единица, вычислялось значение соответствующей функции принадлежности. В столбцах, соответствующих результату, в которых возникала единица, вычислялось значение минимума значений в строке.

Затем по столбцам результатов находился максимум по всем строкам - M_i , $i=1...B$, (Здесь B-число лингвистических термов результатов. Например, для финансовой подсистемы- три термина- F1, F2, F3, то есть B=3)

Строилась функция

$$G(t) = M_1 \mu_1(t) + M_2 \mu_2(t) + \dots + M_k \mu_{1B}(t),$$

где $\mu_i(t)$ – функции принадлежности термов, соответствующих результатам.

С помощью правила Симпсона для вычисления интегралов находился центр тяжести для этой функции на области определения аргумента t . Это значение признавалось результатом применения алгоритма.

Аналогичная процедура выполнялась для всех баз знаний.

Представленный результат является инструментом, позволяющим произвести предварительные заключения о готовности предприятия к внедрению инноваций. Заключения, выданные системой по данным обучающих выборок, совпадают с фактическими выводами руководителей предприятий, по данным которых эти выборки определялись.

Экспертная система реализуется как двухъярусная нечетко-логическая модель. Аргументами нечетко-логического вывода на втором этапе были результаты выводов на первом.

Подход является новым, с одной стороны позволяющим быстро реализовать построение базы знаний из существенного числа правил, с другой - применять быстрый поиск решения оптимизационных задач, определяющих параметры функций принадлежности.

Система реализована в электронных таблицах, что положительно сказалось на использовании этой системы «непродвинутыми» пользователями, создав видимость простого инструмента.

Модель проста в реализации и позволяет быстро изменить как правила базы знаний, так и количество лингвистических термов.

Таким образом, задача, поставленная перед исследователями, была решена.

Литература

1. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB. Математические пакеты расширения. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 480с
2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польского И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — 452 с. ISBN 5-93517-103-1
3. Егоров, В. Н. Основы экономической теории надежности производственных систем [Текст] / В. Н. Егоров, Д. И. Коровин. - М.: Наука, 2006. - 526 с.
4. Дадалко В.А. Инструменты цифровой экономики как способ обеспечения прозрачности хозяйствования промышленного предприятия / В.А. Дадалко, П.П. Топчий, Д.Р. Назырова // Экономика. Налоги. Право. 2018. №5