УДК 33 DOI: 10.14451/1.261.176

Нечётко-множественная модель оценки цифровой зрелости субъектов электроэнергетики во взаимодействии с ИТ-компаниями

© 2026 **Войткевич Станислав Владимирович**
Аспирант кафедры экономики в энергетике и промышленности. Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия.
E-mail: stvlvoytkevich@mail.ru

© 2026 **Лейман Евгений Николаевич**
Кандидат экономических наук, доцент, проректор по модернизации имущественного комплекса и правовой работе. Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия.
E-mail: LeymanYN@mpei.ru

Ключевые слова: цифровая зрелость, электроэнергетика, нечёткая логика, межотраслевое взаимодействие, ИТ-компании.

Статья посвящена разработке методики количественной оценки цифровой зрелости субъектов электроэнергетики, учитывающей характер и интенсивность их взаимодействия с ИТ-компаниями. Актуальность исследования обусловлена тем, что существующие модели цифровой зрелости ориентированы преимущественно на дискретное производство, сферу услуг и государственный сектор и не отражают отраслевую специфику электроэнергетики, включая непрерывность производственных процессов и критичность информационной безопасности. В работе проведён обзор отечественных и зарубежных моделей, выявлены их системные ограничения, среди которых доминирование балльно-экспертных методов, статичность оценки и игнорирование межотраслевого взаимодействия как фактора зрелости. Предложена нечётко-множественная модель, включающая иерархическую систему показателей зрелости и барьеров, аппарат фаззификации и дефаззификации, а также процедуру назначения весов по правилу Фишберна, дифференцированную по типам субъектов отрасли. Обоснован выбор трапециевидной функции принадлежности, обеспечивающей устойчивость оценок к малым вариациям экспертных суждений. Результатом является методика, преобразующая качественные вербальные оценки в количественные интегральные индексы цифровой зрелости.

Введение

Становление концепции цифровой зрелости восходит к модели Ричарда Нолана (1973), выделявшей стадии эволюции обработки данных в организации и заложившей базовый принцип: цифровая зрелость есть траектория последовательного восхождения от низших ступеней к высшим [24]. Этот принцип реализован в моделях CMM/CMMI Института программной инженерии Университета Карнеги-Меллона [22]. Модель MIT Sloan Management Review и Capgemini Consulting эмпирически доказала, что ключевым драйвером цифровой зрелости является не технология, а стратегия [5].

Центральное место среди международных моделей занимает «Индекс зрелости Индустрии 4.0» Германской академии наук и инженерии Acatech [25], оценивающий зрелость по шести ступеням (компьютеризация, связность, видимость, прозрачность, предсказуемость, адаптивность) в разрезе структурных и функциональных областей; дальнейшее развитие модель получила в форме шестимерной модели трансформации производственных компаний в поставщиков умных услуг [11].

К числу иных известных моделей относятся: модель Deloitte, оценивающая зрелость по пяти измерениям и 179 показателям [12]; модель Cisco (Digital Maturity Index) с четырьмя группами параметров [20]; Gartner IT Maturity Model и развиваемые в её рамках модели зрелости цифрового правительства и искусственного интеллекта [26]; модель ODMM ассоциации TM Forum [27]; модель Digital IQ компании PwC и классификация Forrester [23]; концепция «Экспоненциальной организации» С. Исмаила и М. Мэлоуна [21].

В Российской Федерации методология развивается как в рамках государственных инициатив, так и в академической среде. Центр подготовки руководителей и команд цифровой трансформации (CDTO) Высшей школы государственного управления РАНХиГС разработал методологию оценки цифровой зрелости по пяти блокам: клиентоцентричность, цифровая культура, управление на основе данных, цифровая инфраструктура и цифровые кадры [16]. Минкомсвязью России в рамках национальной программы «Цифровая экономика» предложены подходы, ориентированные преимущественно на государственный сектор [13].

Применительно к электроэнергетике задача оценки цифровой зрелости приобретает особую сложность в силу непрерывного характера производства, критической значимости надёжности, многосубъектности отрасли и высокой степени государственного регулирования [4]. Ассоциацией «Цифровая энергетика» рассмотрена модель EY для топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России, формирующая интегральный индекс цифровой готовности (Digital Readiness Level), однако закрытый характер методики ограничивает возможности её научной верификации [2].

Хоботова Л. В., Непринцева Е. В. и Шубин С. А. выделили ключевые барьеры цифровизации отрасли, зафиксировав разрыв между стратегическими целями цифровой трансформации и реальной готовностью субъектов [17]. Шипкова А. С. и Школьник А. В. определили цифровую зрелость как технологическую вооружённость компании [19].

Особого внимания заслуживают работы, применяющие аппарат нечёткой логики. Булыгина О. В. и соавторы разработали подход к построению нечётких биоинспирированных моделей для ситуационного управления проектами [15]. Дли М. И. и соавторы предложили методологии построения нечётких ситуационно-прецедентных моделей региональных экономических систем [8] и локальных нечётких моделей [7]. Веретёхин А. В. разработал методику оценки уровня цифрового развития промышленного предприятия на основе нечёткой логики [3]. Малиновский М. О. и Анисимов А. Ю. предложили подход к оценке уровня и потенциала цифровизации управления бизнес-процессами [14].

Проведённый обзор позволяет выделить следующие системные ограничения существующих моделей. Во-первых, доминирование балльно-экспертных методов и самооценки,

порождающее высокую субъективность результатов [1; 6]. Во-вторых, «лоскутный» характер оценки: модели, разработанные для дискретного производства (Acatech) или сферы услуг (Deloitte), не охватывают ключевые для энергокомпаний аспекты — надёжность энергоснабжения, наблюдаемость сети, качество первичных данных, готовность к интеграции распределённой генерации. В-третьих, игнорирование межотраслевого взаимодействия как фактора зрелости: ни одна модель не включает параметры, характеризующие интенсивность и качество взаимодействия с ИТ-компаниями, тогда как электроэнергетика не производит ИТ-решения самостоятельно, а приобретает, адаптирует и интегрирует их [27]. В-четвёртых, отсутствие отраслевой адаптации к таким параметрам, как наблюдаемость сети, киберзащищённость критической инфраструктуры и совместимость информационных систем со смежными субъектами. В-пятых, игнорирование готовности конечных потребителей. В-шестых, статичность оценки, не позволяющая прогнозировать траекторию развития в условиях растянутой на десятилетия трансформации [9].

Выявленные ограничения обосновывают необходимость разработки специализированной методики, интегрирующей межотраслевое взаимодействие в качестве ключевого оценочного параметра.

Нечётко-множественная модель оценки цифровой зрелости

Традиционные методы, использующие вероятностную неопределённость, требуют статистически значимой выборки повторяющихся событий, тогда как оценка цифровой зрелости конкретного субъекта — задача уникальная, не предполагающая частотной интерпретации. Аппарат теории нечётких множеств предоставляет средства для формализации качественных вербальных утверждений экспертов и их преобразования в количественные оценки.

В рамках нечётко-множественной модели оценки цифровой зрелости субъекта электроэнергетики во взаимодействии с ИТ-компанией (далее — НММ-ЦЗ) сформированы иерархии значимых показателей цифровой зрелости (табл. 1) и отставания (табл. 2).

Выделяются четыре уровня иерархии (с 0 по III), которым соответствуют четыре системы показателей: интегральных показателей (СИП), целевых показателей (СЦП), контрольных показателей (СКП), первичных показателей (СПП), ответственность за которые несут соответствующие организационные уровни управления: высшего руководства, руководителя цифровой трансформации, ведущих специалистов, исполнителей.

Показатели зрелости (группа М) и барьеров (группа В) оцениваются экспертом по 100-балльной шкале, где 0 — минимальное значение (для М признак отсутствует, для В — барьер отсутствует), а 100 — максимальное.

Таблица 1. Иерархическая система показателей цифровой зрелости.

Уровень	Система	Орг. уровень	Показатели						
0	СИП	высшего руководства	M^0 — интегральный показатель цифровой зрелости во взаимодействии с ИТ-компанией						
I	СЦП	руководителя цифровой трансформации	M_1^I — внутренняя цифровая готовность				M_2^I — готовность к межотраслевому цифровому взаимодействию		
II	СКП	ведущих специалистов	M_1^{II}	M_2^{II}	M_3^{II}	M_4^{II}	M_5^{II}	M_6^{II}	M_7^{II}

Продолжение на следующей странице

Таблица 1. Иерархическая система показателей цифровой зрелости. (Продолжение таблицы)

Уровень	Система	Орг. уровень	Показатели						
III	СПП	исполнителей	$M^{III}_{1.1}$	$M^{III}_{2.1}$	$M^{III}_{3.1}$	$M^{III}_{4.1}$	$M^{III}_{5.1}$	$M^{III}_{6.1}$	$M^{III}_{7.1}$
			$M^{III}_{1.2}$	$M^{III}_{2.2}$	$M^{III}_{3.2}$	$M^{III}_{4.2}$	$M^{III}_{5.2}$	$M^{III}_{6.2}$	$M^{III}_{7.2}$
			$M^{III}_{1.3}$	$M^{III}_{2.3}$	$M^{III}_{3.3}$	$M^{III}_{4.3}$	$M^{III}_{5.3}$	$M^{III}_{6.3}$	$M^{III}_{7.3}$

Таблица 2. Иерархическая система показателей цифрового отставания.

Уровень	Система	Орг. уровень	Показатели						
0	СИП	высшего руководства	B^0 – интегральный показатель цифрового отставания/барьеров						
I	СЦП	руководителя цифровой трансформации	B^I_1 – внутренние цифровые барьеры				B^I_2 – барьеры межотраслевого взаимодействия		
II	СКП	ведущих специалистов	B^{II}_1	B^{II}_2	B^{II}_3	B^{II}_4	B^{II}_5	B^{II}_6	B^{II}_7
III	СПП	исполнителей	$B^{III}_{1.1}$	$B^{III}_{2.1}$	$B^{III}_{3.1}$	$B^{III}_{4.1}$	$B^{III}_{5.1}$	$B^{III}_{6.1}$	$B^{III}_{7.1}$
			$B^{III}_{1.2}$	$B^{III}_{2.2}$	$B^{III}_{3.2}$	$B^{III}_{4.2}$	$B^{III}_{5.2}$	$B^{III}_{6.2}$	$B^{III}_{7.2}$
			$B^{III}_{1.3}$	$B^{III}_{2.3}$	$B^{III}_{3.3}$	$B^{III}_{4.3}$	$B^{III}_{5.3}$	$B^{III}_{6.3}$	$B^{III}_{7.3}$

Показатели оцениваются независимо: возможна ситуация, когда один аспект имеет среднюю оценку по М и низкую по В. При оценке эксперты ориентируются на потребности типового проекта межотраслевого взаимодействия с ИТ-компанией (размещение центра обработки данных (ЦОД), обмен данными, совместная аналитика).

Группа зрелости включает семь контрольных показателей:

M^{II}_1 – цифровая инфраструктура и данные: $M^{III}_{1.1}$ – оснащённость системами АСКУЭ и SCADA; $M^{III}_{1.2}$ – качество цифровых каналов связи; $M^{III}_{1.3}$ – интеграция источников данных и качество нормативно-справочной информации (НСИ).

M^{II}_2 – цифровые компетенции персонала: $M^{III}_{2.1}$ – охват персонала программами цифрового обучения; $M^{III}_{2.2}$ – наличие специалистов по работе с данными; $M^{III}_{2.3}$ – цифровая грамотность руководящего состава.

M^{II}_3 – процессная зрелость: $M^{III}_{3.1}$ – уровень регламентации цифровых процессов; $M^{III}_{3.2}$ – автоматизация сбора и обработки производственных данных; $M^{III}_{3.3}$ – зрелость системы управления изменениями.

M^{II}_4 – информационная безопасность: $M^{III}_{4.1}$ – сертификация объектов по требованиям безопасности критической информационной инфраструктуры; $M^{III}_{4.2}$ – зрелость системы управления инцидентами информационной безопасности (SOC); $M^{III}_{4.3}$ – защищённость каналов межсетевого взаимодействия.

M^{II}_5 – организационная готовность к партнёрству: $M^{III}_{5.1}$ – наличие проектного офиса по цифровому взаимодействию; $M^{III}_{5.2}$ – опыт реализации совместных проектов с внешними ИТ-партнёрами; $M^{III}_{5.3}$ – готовность нормативно-правовой базы для двустороннего обмена.

M^{II}_6 – готовность к шеринговой бизнес-модели: $M^{III}_{6.1}$ – наличие неиспользуемых или недозагруженных ресурсов; $M^{III}_{6.2}$ – готовность к ценообразованию по модели экономики совместного использования; $M^{III}_{6.3}$ – гибкость производственных процессов.

M_7^{II} – культурная совместимость: $M_{7.1}^{III}$ – уровень доверия к ИТ-партнёру; $M_{7.2}^{III}$ – совместимость корпоративных культур; $M_{7.3}^{III}$ – готовность к совместному обучению и развитию.

Группа барьеров образует зеркальную структуру.

При заполнении опросных листов по первичным показателям цифровой зрелости (M) необходимо оценивать текущее фактическое состояние субъекта, а не желаемое или планируемое.

При заполнении опросных листов по первичным показателям цифровых барьеров (B) необходимо оценивать выраженность препятствия. Если какой-либо аспект не является препятствием (даже при неидеальном состоянии), необходимо поставить низкий балл.

Каждый первичный показатель снабжён шестибалльной шкалой с содержательными индикаторами, что снижает произвольность экспертных оценок. В качестве примера рассмотрим шкалу оценки для $M_{5.1}^{III}$ (табл. 3).

Таблица 3. Шкала оценки $M_{5.1}^{III}$ (0–100 баллов).

Баллы	Индикатор
0–10	Проектный офис отсутствует; взаимодействие с ИТ-компаниями — нерегулярное, через общий отдел закупок
11–30	Функции координации возложены на сотрудника в порядке совмещения; нет выделенного бюджета и KPI
31–50	Создана временная рабочая группа под конкретный проект; ограниченные полномочия; зависимость от текущих приоритетов
51–70	Постоянно действующий проектный офис; выделенный руководитель и команда (3–5 человек); собственный бюджет; KPI по количеству и результатам проектов
71–90	Проектный офис как центр компетенций; кросс-функциональная команда (ИТ, юристы, инженеры, экономисты); право инициировать проекты; регулярная отчётность перед руководством
91–100	Проектный офис — стратегический орган; портфель проектов с ИТ-партнёрами; интеграция в систему стратегического планирования; тиражирование опыта на дочерние общества

При наличии группы из m экспертов рассчитывается усреднённая оценка каждого первичного показателя как среднее арифметическое индивидуальных оценок. Далее проводится фаззификация — перевод значения в лингвистическую переменную с использованием стандартного пятиуровневого классификатора с узловыми точками $\alpha = (0{,}1; 0{,}3; 0{,}5; 0{,}7; 0{,}9)$, где нормированное значение получается делением балльной оценки на 100.

Выбор типа функции принадлежности не является технической формальностью. Треугольная функция имеет единственную точку максимума и линейно убывает в обе стороны, что придаёт модели два недостатка: неспособность выразить размытость экспертного суждения и неустойчивость к малым вариациям оценки (сдвиг на один балл может радикально изменить вектор функций принадлежности). Гауссова функция обеспечивает плавный переход, однако её параметры лишены прозрачной связи с лингвистическими переменными и требуют вычисления экспоненты.

Трапециевидная функция устраняет недостатки треугольной благодаря наличию плато — интервала значений, на котором функция принадлежности равна единице. В ситуации, когда эксперты способны указать лишь диапазон значений терма, но не обосновать форму распределения внутри него, наиболее корректным с точки зрения теории информации является выбор функции с равномерным распределением, то есть трапециевидной. Параметры функций принадлежности для НММ-ЦЗ представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры функций принадлежности для НММ-ЦЗ.

Терм	Код	a	b	c	d	Содержательная интерпретация
Очень низкий	ОН	0,00	0,00	0,05	0,25	Признак практически отсутствует; оценки 0–10 баллов — с высокой уверенностью
Низкий	Н	0,10	0,20	0,30	0,45	Признак проявляется слабо; оценки 20–30 баллов — ядро терма
Средний	С	0,30	0,45	0,55	0,70	Средний уровень; плато охватывает 45–55 баллов, обеспечивая устойчивость
Высокий	В	0,55	0,70	0,80	0,90	Признак проявляется сильно; оценки 70–80 баллов — ядро терма
Очень высокий	ОВ	0,75	0,90	1,00	1,00	Признак проявляется максимально; оценки 90–100 баллов — с высокой уверенностью

Нормированное значение: $\tilde{x} = x/100$ (приведение к диапазону [0; 1]).

Для каждого из пяти термов лингвистической переменной («Очень низкий» ОН, «Низкий» Н, «Средний» С, «Высокий» В, «Очень высокий» ОВ) вычисляется значение трапециевидной функции принадлежности $\mu(\tilde{x})$. Аналитическая запись трапециевидной функции принадлежности для СПП:

$$\mu(\tilde{x}; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leqslant a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leqslant x \leqslant c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geqslant d \end{cases}$$

Результатом фаззификации является вектор из пяти значений функций принадлежности:

$$\mu(M^{III}_{k,j}) = (\mu_{ОН}, \mu, \mu, \mu, \mu_{ОВ})$$
$$\mu(B^{III}_{k,j}) = (\mu_{ОН}, \mu, \mu, \mu, \mu_{ОВ}).$$

Каждый показатель СКП M^{II}_k и B^{II}_k ($k = 1 \dots 7$) получается путём свёртки трёх соответствующих первичных показателей СПП с использованием весов Фишберна и нечётко-множественного агрегирования.

Для оценки каждого показателя СКП выделено по три первичных индикатора СПП. Равновзвешенная свёртка ($w = 1/3$ для каждого из трёх первичных показателей) является допустимым упрощением на этапе первоначальной апробации методики, однако для практического применения она обладает принципиальным недостатком: она игнорирует существенные различия в приоритетности первичных показателей для разных типов субъектов электроэнергетики. Предлагается процедура назначения весов по правилу Фишберна.

Ранжирование показателей (определение того, какой из трёх первичных показателей в данной группе является приоритетным) осуществляется экспертно для каждого типа субъекта электроэнергетики. Для трёх показателей, упорядоченных по убыванию приоритетности ($r_1 \to r_2 \to r_3$), веса Фишберна рассчитываются по формуле:

$$w_r = \frac{2 \cdot (n - r + 1)}{n \cdot (n + 1)},$$

где $n = 3$ — количество показателей. Тогда:

$$w_1 = \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot 4} = \frac{6}{12} = 0{,}5,$$
$$w_2 = \frac{2 \cdot 2}{3 \cdot 4} = \frac{4}{12} = 0{,}333,$$
$$w_3 = \frac{2 \cdot 1}{3 \cdot 4} = \frac{2}{12} = 0{,}167.$$

В качестве примера рассмотрим ранжирование показателей СПП в группе M^{II}_5 (табл. 5).

Таблица 5. Ранжирование показателей СПП в группе M_5^{II}.

Тип субъекта	Приоритет 1 $w_1 = 0{,}5$	Приоритет 2 $w_2 = 0{,}333$	Приоритет 3 $w_3 = 0{,}167$
1.1. Генерация — АЭС, 2. Сетевые компании	$M_{5.3}^{III}$	$M_{5.2}^{III}$	$M_{5.1}^{III}$
1.2. Генерация — ГЭС, 1.3. Генерация — ТЭС	$M_{5.3}^{III}$	$M_{5.1}^{III}$	$M_{5.2}^{III}$
1.4. Генерация — ВИЭ, 3. Энергосбытовые компании, 4. Крупные потребители/просьюмеры	$M_{5.2}^{III}$	$M_{5.3}^{III}$	$M_{5.1}^{III}$

Для АЭС любое взаимодействие с внешним партнёром должно быть безупречно урегулировано юридически: от режима допуска до распределения ответственности за инциденты; без контрактной основы ни проектный офис, ни опыт не имеют легитимного фундамента. Для сетевых компаний первична та же логика: без типовых контрактов двустороннего обмена по модели экономики совместного использования — проекты невозможны. Опыт проектов — второй приоритет: у крупных сетевых компаний уже есть опыт взаимодействия с ИТ-компаниями (например, EnergyTool), и этот опыт может быть масштабирован; для АЭС референции важны, но вторичны по отношению к правовой основе. Проектный офис — третий: на АЭС организационная структура и так высокоформализована; в сетевых компаниях при наличии опыта и нормативной базы проектный офис создаётся достаточно быстро.

Нормативная база для ГЭС и ТЭС также является приоритетом № 1 по общей для всех генерирующих компаний причине: без типовых контрактов двустороннего обмена по модели экономики совместного использования — проекты не имеют правовой основы. Однако в отличие от АЭС, на ГЭС и ТЭС нет столь же жёсткой организационной структуры, поэтому создание выделенного проектного офиса является значимым самостоятельным шагом и выходит на второе место. Опыт проектов — третий приоритет: он нарабатывается после создания организационных механизмов.

Сектор ВИЭ — относительно молодой и динамичный, здесь уже есть опыт взаимодействия с ИТ-компаниями (системы прогнозирования, удалённого мониторинга), и этот опыт — основной драйвер для расширения партнёрства. Энергосбыт по своей природе является информационным посредником и исторически теснее взаимодействует с ИТ-компаниями (биллинг, CRM, личные кабинеты); накопленный опыт определяет готовность к более сложным формам партнёрства. Промышленные предприятия часто уже имеют опыт работы с ИТ-интеграторами (MES, ERP, IoT-платформы) и выбирают ИТ-партнёров исходя из этого опыта. Нормативная база — второй приоритет для всех трёх типов. Проектный офис — третий: ВИЭ-компании относительно невелики и не нуждаются в отдельной громоздкой структуре; заказчики-потребители не создают проектные офисы под внешних ИТ-партнёров — этим занимается сам партнёр.

Сводная таблица весов Фишберна для всех типов субъектов представлена ниже (табл. 6).

Таблица 6. Весовые коэффициенты для СПП.

СКП	СПП							
M_1^{II}	$M_{1.1}^{III}$	0,333	0,500	0,500	0,333	0,500	0,167	0,167
	$M_{1.2}^{III}$	0,167	0,333	0,333	0,167	0,333	0,333	0,333
	$M_{1.3}^{III}$	0,500	0,167	0,167	0,500	0,167	0,500	0,500

Продолжение на следующей странице

Таблица 6. Весовые коэффициенты для СПП. (Продолжение таблицы)

СКП	СПП							
M_2^{II}	$M_{2.1}^{III}$	0,167	0,333	0,333	0,167	0,333	0,167	0,167
	$M_{2.2}^{III}$	0,500	0,167	0,167	0,500	0,167	0,500	0,500
	$M_{2.3}^{III}$	0,333	0,500	0,500	0,333	0,500	0,333	0,333
M_3^{II}	$M_{3.1}^{III}$	0,333	0,500	0,500	0,167	0,333	0,167	0,167
	$M_{3.2}^{III}$	0,167	0,167	0,167	0,500	0,167	0,500	0,500
	$M_{3.3}^{III}$	0,500	0,333	0,333	0,333	0,500	0,333	0,333
M_4^{II}	$M_{4.1}^{III}$	0,333	0,333	0,333	0,167	0,500	0,167	0,167
	$M_{4.2}^{III}$	0,167	0,500	0,500	0,333	0,333	0,500	0,333
	$M_{4.3}^{III}$	0,500	0,167	0,167	0,500	0,167	0,333	0,500
M_5^{II}	$M_{5.1}^{III}$	0,167	0,333	0,333	0,167	0,167	0,167	0,167
	$M_{5.2}^{III}$	0,333	0,167	0,167	0,500	0,333	0,500	0,500
	$M_{5.3}^{III}$	0,500	0,500	0,500	0,333	0,500	0,333	0,333
M_6^{II}	$M_{6.1}^{III}$	0,333	0,500	0,500	0,500	0,500	0,167	0,500
	$M_{6.2}^{III}$	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,500	0,167
	$M_{6.3}^{III}$	0,500	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
M_7^{II}	$M_{7.1}^{III}$	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
	$M_{7.2}^{III}$	0,333	0,333	0,333	0,167	0,333	0,167	0,167
	$M_{7.3}^{III}$	0,167	0,167	0,167	0,333	0,167	0,333	0,333

Обозначения типов субъектов электроэнергетики: 1.1. Генерация — АЭС; 1.2. Генерация — ГЭС; 1.3. Генерация — ТЭС; 1.4. Генерация — ВИЭ; 2. Сетевые компании; 3. Энергосбытовые компании; 4. Крупные потребители / просьюмеры

Барьерные показатели $B_{k.j}^{III}$ ранжируются идентично соответствующим показателям $M_{k.j}^{III}$. Расчёт агрегированной функции принадлежности для k-го контрольного показателя:

$$\mu(M_k^{II}) = \sum_{j=1}^{3} w_{kj} \cdot \mu(M_{k.j}^{III}),$$

$$\mu(B_k^{II}) = \sum_{j=1}^{3} w_{kj} \cdot \mu(B_{k.j}^{III}).$$

Дефаззификация — перевод нечёткого числа в количественную оценку контрольного показателя методом центра тяжести для дискретного случая:

$$M_k^{II} = \frac{\sum_{q=1}^{5} \alpha_q \mu_q}{\sum_{q=1}^{5} \mu_q} \cdot 100\%,$$

где α_q — узловые точки классификатора, μ_q — соответствующее значение агрегированной функции принадлежности.

Аналогичная процедура выполняется для барьерных показателей B_k^{II}. Полученные значения M_k^{II} и B_k^{II} в процентах — это и есть показатель Уровня II, который далее участвует в свёртке в целевые показатели. Для показателей СКП лингвистическая переменная «Уровень показателя» также имеет пять значений:

- M_{i1}^{II}, B_{i1}^{II} — нечёткое подмножество «Очень низкий уровень»;
- M_{i2}^{II}, B_{i2}^{II} — нечёткое подмножество «Низкий уровень»;
- M_{i3}^{II}, B_{i3}^{II} — нечёткое подмножество «Средний уровень»;
- M_{i4}^{II}, B_{i4}^{II} — нечёткое подмножество «Высокий уровень»;
- M_{i5}^{II}, B_{i5}^{II} — нечёткое подмножество «Очень высокий уровень».

Для показателей СКП (уровень II) функции принадлежности имеют вид:

$$\mu_1(u)^{II} = \begin{cases} 1, & 0 \leqslant u < 0{,}15 \div N^{II} \\ 10N(0{,}25 \div N^{II} - u), & 0{,}15 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}25 \div N^{II} \\ 0, & 0{,}25 \div N^{II} \leqslant u < 1 \end{cases}$$

$$\mu_2(u)^{II} = \begin{cases} 0, & 0 \leqslant u < 0{,}15 \div N^{II} \\ 10N(0{,}25 \div N^{II} - u), & 0{,}15 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}25 \div N^{II} \\ 1, & 0{,}25 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}35 \div N^{II} \\ 10N(0{,}45 \div N^{II} - u), & 0{,}35 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}45 \div N^{II} \\ 0, & 0{,}45 \div N^{II} \leqslant u < 1 \end{cases}$$

$$\mu_3(u)^{II} = \begin{cases} 0, & 0 \leqslant u < 0{,}15 \div N^{II} \\ 10N(0{,}35 \div N^{II} - u), & 0{,}35 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}45 \div N^{II} \\ 1, & 0{,}45 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}55 \div N^{II} \\ 10N(0{,}65 \div N^{II} - u), & 0{,}55 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}65 \div N^{II} \\ 0, & 0{,}65 \div N^{II} \leqslant u < 1 \end{cases}$$

$$\mu_4(u)^{II} = \begin{cases} 0, & 0 \leqslant u < 0{,}15 \div N^{II} \\ 10N(0{,}55 \div N^{II} - u), & 0{,}55 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}65 \div N^{II} \\ 1, & 0{,}65 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}75 \div N^{II} \\ 10N(0{,}85 \div N^{II} - u), & 0{,}75 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}85 \div N^{II} \\ 0, & 0{,}85 \div N^{II} \leqslant u < 1 \end{cases}$$

$$\mu_5(u)^{II} = \begin{cases} 1, & 0 \leqslant u < 0{,}75 \div N^{II} \\ 10N(0{,}75 \div N^{II} - u), & 0{,}75 \div N^{II} \leqslant u < 0{,}85 \div N^{II} \\ 0, & 0{,}85 \div N^{II} \leqslant u < 1 \end{cases}$$

где N^{II} – количество показателей зрелости (барьеров) на втором уровне иерархии (СКП); u – нормированное значение показателя M_k^{II} или B_k^{II}. Для НММ-ЦЗ N^{II} = 7, что даёт следующие трапециевидные числа для классификации показателей СКП (табл. 7).

Таблица 7. Уровни значений показателей СКП.

Класс	Трапециевидные числа, %
Очень низкий уровень (ОН)	(0; 0; 2,1; 3,6)
Низкий уровень (Н)	(2,1; 3,6; 5,0; 6,4)
Средний уровень (С)	(5,0; 6,4; 7,9; 9,3)
Высокий уровень (В)	(7,9; 9,3; 10,7; 12,1)
Очень высокий уровень (ОВ)	(10,7; 12,1; 100; 100)

Поскольку каждый СКП относится только к одному СЦП, определение значимости показателя СКП в показателе СЦП (S_{ij}) также проводится по правилу Фишберна (табл. 8, табл. 9).

Таблица 8. Обоснование весов для целевых показателей для M_1^I (СКП → СЦП).

Тип	Ранг				Значимость показателя			
	M_1^{II}	M_2^{II}	M_3^{II}	M_4^{II}	M_1^{II}	M_2^{II}	M_3^{II}	M_4^{II}
1.1., 3, 4	3	2	4	1	0,2	0,3	0,1	0,4
1.2., 1.3., 1.4., 2	2	3	4	1	0,3	0,2	0,1	0,4

Обозначения типов субъектов электроэнергетики: 1.1. Генерация — АЭС; 1.2. Генерация — ГЭС; 1.3. Генерация — ТЭС; 1.4. Генерация — ВИЭ; 2. Сетевые компании; 3. Энергосбытовые компании; 4. Крупные потребители/просьюмеры.

Таблица 9. Обоснование весов для целевых показателей для M_2^I (СКП → СЦП).

Тип	Ранг			Значимость показателя		
	M_5^{II}	M_6^{II}	M_7^{II}	M_5^{II}	M_6^{II}	M_7^{II}
1.1., 1.2., 1.3., 1.4., 2, 3	1	2	3	0,500	0,333	0,167
4	1	3	2	0,500	0,167	0,333

Значимость показателей для B_1^I и B_2^I назначаются по аналогии.

Высший приоритет отдается информационной безопасности для всех субъектов электроэнергетики. Без выполнения требований ФЗ-187 и защищённых каналов подключение ИТ-партнёра невозможно для любого субъекта. Это жёсткое регуляторное ограничение, которое нельзя обойти.

Второй и третий приоритеты дифференцированы по субъектам электроэнергетики. Для АЭС, сбыта и потребителей вторым приоритетом выступают цифровые компетенции персонала. Дефицит data-специалистов и непонимание цифровых бизнес-моделей руководством — критический тормоз. Инфраструктура у этих субъектов либо уже на высоком уровне (АЭС), либо не является их прямым активом (Сбыт, Потребители), поэтому она имеет третий приоритет. Для ГЭС, ТЭС, ВИЭ, Сетей наоборот, эти субъекты владеют физической инфраструктурой, и без охвата АСКУЭ/SCADA ИТ-партнёру просто нечего анализировать. Инфраструктура — необходимый материальный базис и имеет второй приоритет; компетенции наращиваются на его основе, поэтому компетенции — третий приоритет.

Процессная зрелость имеет низший приоритет, так как регламентация, автоматизация и управление изменениями формализуются по мере накопления опыта цифрового взаимодействия. На этапе оценки готовности к партнёрству процессы объективно наименее критичны: пилотный проект можно запустить и без идеально отлаженных регламентов.

Организационная готовность к партнёрству (для всех типов) — «скелет» партнёрства. Без типовых контрактов двустороннего обмена (IaaS+, Energy Pool), без проектного офиса и без опыта проектов ни шеринговая бизнес-модель, ни культурная совместимость не могут быть реализованы. Это справедливо для любого субъекта: АЭС нужна нормативная база для размыкания КИИ; сетям — контрактная основа для размещения ЦОД на ПС; сбыту — механизмы обмена данными. Организационная готовность — необходимое условие, без которого остальные факторы неприменимы.

Для генерации (1.1–1.4), Сетей (2), Сбыта (3) культурная совместимость значима, но формируется в процессе взаимодействия, а не до него; она не может быть «предварительным условием» в той же степени, что и наличие ресурса.

Потребители (промышленные предприятия) взаимодействуют с ИТ-компаниями преимущественно через гибридную модель (собственный ИТ-отдел плюс внешний подрядчик). Для них культурная совместимость команд (скорость и надёжность, итеративность и план) важнее, у потребителя, как правило, нет значимых недозагруженных ресурсов для предоставления ИТ-партнёру в обмен на вычислительные мощности.

Расчёт степени частных показателей зрелости и барьеров (уровень СКП) осуществляется с использованием выражений:

$$M_{i,j}^{II} = S_{ij} \sum_{k=1}^{5} \alpha_k \mu_{ik}(u),$$
$$B_{i,j}^{II} = S_{ij} \sum_{k=1}^{5} \alpha_k \mu_{ik}(u)$$

Целевые показатели определяются суммированием соответствующих частных показателей:

$$M_1^I = M_{1,1}^{II} + M_{1,2}^{II} + M_{1,3}^{II} + M_{1,4}^{II},$$
$$M_2^I = M_{25}^{II}, + M_{2,6}^{II} + M_{2,7}^{II},$$
$$B_1^I = B_{1,1}^{II} + B_{1,2}^{II} + B_{1,3}^{II} + B_{1,4}^{II},$$
$$B_2^I = B_{2,5}^{II} + B_{2,6}^{II} + B_{2,7}^{II}.$$

Интегральные показатели рассчитываются как средневзвешенные от целевых:

$$M^0 = \sum_{j=1}^{2} r_j^M M_j^I = 0{,}4 \cdot M_1^I + 0{,}6 \cdot M_2^I$$
$$B^0 = \sum_{j=1}^{2} r_j^B B_j^I = 0{,}4 \cdot B_1^I + 0{,}6 \cdot B_2^I.$$

В условиях, когда внутренняя цифровая готовность субъектов электроэнергетики в целом сопоставима, дифференциация уровней зрелости определяется именно готовностью к межотраслевому взаимодействию, что и отразилось при назначении весов r_j^M и r_j^B.

Для лингвистической переменной «Цифровая зрелость» (уровни I и 0) определён следующий набор значений:

- M_{j1}^I – нечёткое подмножество «Минимальная готовность»;
- M_{j2}^I – нечёткое подмножество «Низкая готовность»;
- M_{j3}^I – нечёткое подмножество «Средняя готовность»;
- M_{j4}^I – нечёткое подмножество «Высокая готовность»;
- M_{j5}^I – нечёткое подмножество «Очень высокая готовность».

Аналогично для лингвистической переменной «Цифровой барьер»:

- B_{j1}^I – нечёткое подмножество «Барьер незначителен»;
- B_{j2}^I – нечёткое подмножество «Низкий барьер»;
- B_{j3}^I – нечёткое подмножество «Средний барьер»;
- B_{j4}^I – нечёткое подмножество «Высокий барьер»;
- B_{j5}^I – нечёткое подмножество «Критический барьер».

Для показателей СЦП и СИП (уровни I и 0) функции принадлежности унифицированы и имеют стандартный вид, не зависящий от количества показателей (рис. 1).

Итоговый показатель цифровой зрелости во взаимодействии с ИТ-компанией рассчитывается как разность между интегральной зрелостью и интегральным барьером:

$$P^{DM} = M^0 - B^0.$$

Положительное значение P^{DM} свидетельствует о преобладании факторов зрелости над барьерами; отрицательное – о доминировании барьеров, требующем целенаправленных мероприятий по их устранению.

Для лингвистической переменной «Итоговый показатель цифровой зрелости» вводится пять уровней, привязанных к стадиям реализации модели ЭИС:

- P_1^{DM} – нечёткое подмножество «Начальный уровень» (I);
- P_2^{DM} – нечёткое подмножество «Базовый уровень» (II);

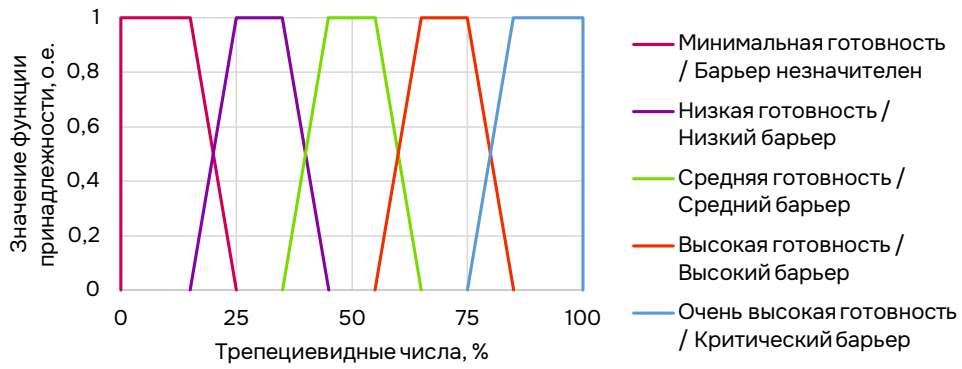


Рис. 1. Уровни значений показателей СЦП и СИП.

- P_3^{DM} – нечёткое подмножество «Продвинутый уровень» (III);
- P_4^{DM} – нечёткое подмножество «Партнёрский уровень» (IV);
- P_5^{DM} – нечёткое подмножество «Симбиотический уровень» (V).

Классификация уровня цифровой зрелости осуществляется с использованием трапециевидных чисел (табл. 10).

Таблица 10. Уровни итогового показателя цифровой зрелости.

Уровень зрелости	Трапециевидные числа, %	Характеристика
I. Начальный (ОН)	(-100; -100; -5; 0)	Фрагментарные цифровые процессы; взаимодействие с ИТ-компаниями отсутствует
II. Базовый (Н)	(-5; 0; 5; 10)	Базовые цифровые системы внедрены; взаимодействие ограничено закупками
III. Продвинутый (С)	(5; 10; 15; 20)	Выстроена цифровая инфраструктура; есть опыт совместных проектов
IV. Партнёрский (В)	(15; 20; 25; 30)	Организационная и культурная готовность к двустороннему обмену
V. Симбиотический (ОВ)	(25; 30; 100; 100)	Полная интеграция цифровых контуров при изоляции КИИ

Заключение

В результате проведённого исследования разработана нечётко-множественная модель оценки цифровой зрелости субъектов электроэнергетики во взаимодействии с ИТ-компаниями (НММ-ЦЗ), устраняющая ключевые ограничения существующих методик. В отличие от известных моделей, ориентированных преимущественно на дискретное производство, сферу услуг и государственный сектор, предложенный подход учитывает отраслевую специфику электроэнергетики и вводит межотраслевое взаимодействие в качестве самостоятельного оценочного измерения. Показатели организационной готовности к партнёрству, готовности к шеринговой бизнес-модели и культурной совместимости позволяют различать субъекты с сопоставимой внутренней цифровой инфраструктурой, но принципиально разными моделями взаимодействия с ИТ-сектором, что невозможно в рамках традиционных методик.

Методически модель строится на четырёхуровневой иерархии показателей, объединяющей контуры зрелости и цифровых барьеров. Применение аппарата теории нечётких множеств с трапециевидными функциями принадлежности обеспечивает формализацию качественных вербальных экспертных суждений и устойчивость оценок к малым вариациям исходных данных. Дифференциация весовых коэффициентов по правилу Фишберна, выполненная в разрезе семи типов субъектов электроэнергетики, отражает неоднородность отраслевой структуры — от атомной генерации с жёсткими режимными ограничениями до крупных потребителей-просьюмеров.

Итоговый показатель цифровой зрелости, рассчитываемый как разность между интегральной зрелостью и интегральным барьером, даёт наглядную количественную характеристику доминирования факторов готовности над ограничениями и привязан к пяти стадиям развития — от начального до симбиотического уровня. Это позволяет не только позиционировать субъект на шкале зрелости, но и выявлять приоритетные направления устранения барьеров, сдерживающих переход к более высоким стадиям цифрового партнёрства с ИТ-компаниями.

Предложенная методика применима для сопоставительной оценки субъектов отрасли, обоснования управленческих решений в области цифровой трансформации и мониторинга динамики зрелости на протяжённых горизонтах планирования. Направлениями дальнейших исследований выступают апробация модели на репрезентативной выборке субъектов электроэнергетики, верификация экспертных шкал, а также расширение состава межотраслевых параметров, учитывающих развитие моделей двустороннего обмена ресурсами и интеграцию распределённой генерации.

Библиографический список

1. *Абрамов В. И.*, *Борзов А. В.*, *Семенков К. Ю.* Теоретико-методологический анализ моделей цифровой зрелости для российских компаний // Известия ВУЗов ЭФиУП. — 2021. — 4 (50). — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoretiko-metodologicheskiy-analiz-modeley-tsifrovoy-zrelosti-dlya-rossiyskih-kompaniy (дата обр. 15.12.2025).
2. Альманах / Ассоциации «Цифровая энергетика». — URL: https://www.digital-energy.ru/activity/almanac/ (дата обр. 30.07.2026).
3. *Веретёхин А. В.* Оценка уровня цифрового развития промышленного предприятия на основе метода нечеткой логики // π-Economy. — 2025. — 18 (1). — С. 139—159. — DOI: 10.18721/JE.18108. — EDN UBWBGM.
4. *Гаффаров Р. Ф.*, *Александров С. А.*, *Харитонов М. Ю.* Текущее состояние цифровизации в электроэнергетике: проблемы и пути их решения // Энергоэксперт. — 2020. — 1(73). — С. 12—14. — EDN QRRZQK.
5. *Гилева Т. А.* Цифровая зрелость предприятия: методы оценки и управления // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. — 2019. — 1 (27). — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-zrelost-predpriyatiya-metody-otsenki-i-upravleniya (дата обр. 03.06.2026).
6. *Дериземля В. Е.*, *Тер-Григорьянц А. А.* Методические положения оценки цифровой зрелости экономических систем // Вестник РУДН. Серия: Экономика. — 2021. — № 1. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-polozheniya-otsenki-tsifrovoy-zrelosti-ekonomicheskih-sistem (дата обр. 15.12.2025).
7. *Дли М. И.*, *Соколов А. М.*, *Воротилова М. Ю.* Построение локальных нечетких моделей для ситуационного управления сложными объектами на основе прецедентов // Программные продукты и системы. — М., 2025. — № 3. — С. 389—402. — DOI: 10.15827/0236-235X.151.389-402. — EDN: WREMPA.
8. *Дли М. И.*, *Черновалова М. В.*, *Соколов А. М.* Построение нечетких ситуационно-прецедентных моделей региональных экономических систем с использованием онтологий // Прикладная информатика. — 2025. — Т. 20, 2(116). — С. 112—125. — DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-2-112-125. — EDN DDLDXL.
9. Инструментарий оценки цифровой зрелости интеллектуальной промышленной экосистемы на основе коэволюции и экосистемной синергии / А. В. Бабкин [и др.] // π-Economy. — 2025. — 18 (4). — С. 32—53. — DOI: https.
10. *Кириллова Е. А.* Комплексная оценка возможностей реализации инновационных процессов промышленным предприятием на основе анализа профиля его взаимодействия // Информационное общество. — 2025. — № 2. — С. 158—167. — DOI: 10.52605/16059921_2025_02_158. — EDN LZONEZ.

11. *Краковская И. Н.*, *Корокошко Ю. В.*, *Слушкина Ю. Ю.* Цифровая зрелость промышленных предприятий: опыт оценки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. — 2024. — С. 433—459. — DOI: 10.21638/spbu05.2024.305. — EDN PFVQJG.
12. *Краснощеков Д. С.* Анализ и развитие методик оценки цифровой зрелости корпораций // Kant. — 2026. — 1 (58). — С. 254—259. — DOI: 10.24923/2222-243X.2026-58.35.
13. *Курлов В. В.*, *Косухина М. А.*, *Курлов А. В.* Модель оценки цифровой зрелости промышленного предприятия // Экономика и управление. — 2022. — Т. 28, № 5. — С. 439—451. — DOI: 10.35854/1998-1627-2022-5-439-451. — EDN JRHSBO.
14. *Малиновский М. О.*, *Анисимов А. Ю.* Оценка уровня и потенциала цифровизации управления бизнес-процессами // Вопросы экономики и права. — 2023. — № 178. — С. 97—103. — DOI: 10.14451/2.178.97. — EDN AMXQST.
15. Обобщенный подход к построению нечетких биоинспирированных моделей для ситуационного управления проектами / О. В. Булыгина [и др.] // Прикладная информатика. — 2025. — Т. 20, 5(119). — С. 22—45. — DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-5-22-45. — EDN WFQKUC.
16. Стратегия цифровой трансформации: написать, чтобы выполнить. — М. : РАНХиГС, 2021. — 184 с.
17. *Хоботова Л. В.*, *Непринцева Е. В.*, *Шубин С. А.* Стратегия цифровой трансформации: оценка цифровой зрелости электроэнергетической отрасли России // Стратегические решения и риск-менеджмент. — 2022. — 13(3). — С. 234—244. — DOI: 10.17747/2618-947X-2022-3-234-244.
18. *Чурсин А. А.*, *Кокуйцева Т. В.* Развитие методов оценки цифровой зрелости организации с учетом регионального аспекта // Экономика региона. — 2022. — Т. 18, № 2. — С. 450—463. — DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-2-11. — EDN ZTOECV.
19. *Шипкова О. Т.*, *Школьник К. С.* Формирование методики оценки цифровой зрелости корпорации на основе открытых данных // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2023. — Т. 13, 8А. — С. 356—367. — DOI: 10.34670/AR.2023.93.77.033. — EDN HNRNJB.
20. *Akdil K. Y.*, *Ustundag A.*, *Cevikcan E.* Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy // Industry 4.0: Managing The Digital Transformation. — Springer International Publishing, 09/2017. — P. 61–94. — ISBN 9783319578705. — DOI: 10.1007/978-3-319-57870-5_4.
21. *Brodny J.*, *Tutak M.* Assessing the level of digital maturity of enterprises in the Central and Eastern European countries using the MCDM and Shannon's entropy methods // PLOS ONE / ed. by M. Keshavarz-Ghorabaee. — 2021. — July. — Vol. 16, no. 7. — e0253965. — ISSN 1932-6203. — DOI: 10.1371/journal.pone.0253965.
22. Capability Maturity Model for Software (Version 1.1). (SEI Report CMU/SEI-93-TR-024) / M. Paulk [et al.]. — 1993. — URL: https://www.sei.cmu.edu/library/capability-maturity-model-for-software-version-11/.
23. *Langer B.* Understanding Data & Analytics Maturity: A Systematic Review of Maturity Model Composition. — Springer Science, Business Media LLC, 01/2025. — P. 205–227. — DOI: 10.1007/s41471-024-00205-2.
24. *Nolan R. L.* Managing the computer resource: a stage hypothesis // Communications of the ACM. — 1973. — Vol. 16, no. 7. — P. 399–405.
25. Schuh Günther, Anderl Reiner, Gausemeier Jürgen, Wahlster Wolfgang, Kagermann Henning, Dumitrescu Roman, Hocken Christian, Winter Johannes, Blocher Anselm. Acatech Industrie 4.0 Maturity Index — Managing the Digital Transformation of Companies. — Herbert Utz Verlag, 2017. — 60 p. — ISBN 2192-6174.
26. *Schumacher A.*, *Erol S.*, *Sihn W.* A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises // Procedia CIRP. — 2016. — Vol. 52. — P. 161–166. — ISSN 2212-8271. — DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.040.
27. The Readiness of the European Union to Embrace the Fourth Industrial Revolution / E. Kuruczeleki [et al.] // Management. — 2016. — No. 11.