

Модель технологической зрелости для оценки готовности аэрокосмического сектора к Индустрии 4.0

Бруна Антунеш де Оливейра

Эксперт, brunaantunesdeoliveira@gmail.com

Франсиско Криштовао Лоуренсу де Мело

Профессор, francisco.frapi@gmail.com

Технологический институт авиации (Aeronautics Institute of Technology – ITA), Бразилия, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acacias, São José dos Campos – SP, 12228-900- Brazil

Аннотация

Аэрокосмическая индустрия как одна из наиболее наукоемких отраслей выступает в двойной роли по отношению к передовым технологиям, являясь одновременно их генератором и пользователем. Превентивно адаптируясь к более сложным стратегиям и технологиям, зачастую в ритме нелинейных «скачков», она вытягивает и другие сектора на недостижимые ранее уровни развития.

В статье рассматриваются основные тренды и технологические достижения в мировой аэрокосмической индустрии, касающиеся новых материалов для летательных аппаратов, наиболее перспективных направлений для инвестиций, описывается

трансформация глобальных отраслевых цепочек стоимости. Авторы предлагают оригинальную модель для оценки технологической зрелости аэрокосмического сектора. Данный инструмент апробирован на примере Бразилии. Пилотное тестирование выявило, что для местных аэрокосмических компаний, при их достаточно развитой промышленной базе и привлекательности даже для рынков развитых стран, по большинству рассмотренных аспектов технологической зрелости их потенциал в отношении Индустрии 4.0 еще ожидает своего раскрытия. Представленная модель может быть адаптирована к оценке технологической зрелости других отраслей экономики.

Ключевые слова: трансформация глобальных цепочек стоимости; инновации; аэрокосмическая промышленность; технологическая трансформация; Индустрия 4.0; производственные технологии; технологическая зрелость; национальные отраслевые инновационные системы

Цитирование: De Oliveira B.A., De Melo F.C.L. (2024) Applying the Industry 4.0 Maturity Models to the Aerospace Sector. *Foresight and STI Governance*, 18(4), pp. 77–87. DOI: 10.17323/2500-2597.2024.4.77.87

Applying the Industry 4.0 Maturity Models to the Aerospace Sector

Bruna Antunes de Oliveira

Expert, brunaantunesdeoliveira@gmail.com

Francisco Cristovão Lourenço de Melo

Professor, francisco.frapi@gmail.com

Aeronautics Institute of Technology – ITA, Brazil, Praça Marechal Eduardo Gomes,
50 – Villayes Acacias, São José dos Campos – SP, 12228-900- Brazil

Abstract

The aerospace industry is a sector with primary demand for mastering cutting-edge technologies and innovations. It has the potential to pull other sectors to previously unattainable levels. Its current transformations and emerging new vectors are of key importance for a wide range of areas in the economy and society. Currently, companies in this sector are faced with the challenges of mastering Industry 4.0 technologies. The article examines the main trends and technological achievements in the global aerospace industry. Based on the presented picture, the authors propose an

adapted model for assessing the technological maturity of the aerospace sector, tested on the example of Brazil. Pilot testing of the companies included in it, using this model, showed that for most of the aspects considered, the level of technological readiness does not exceed the second (with a scale of five levels), and this is despite the fact that the products of the Brazilian aerospace sector are in high demand in many countries, including developed ones. The presented model can be adapted to assess the technological maturity of other sectors of the economy.

Keywords: global value chain transformation; innovation; aerospace industry; technological transformation; Industry 4.0; manufacturing technologies; technological maturity; national sectoral innovation systems

Citation: De Oliveira B.A., De Melo F.C.L. (2024) Applying the Industry 4.0 Maturity Models to the Aerospace Sector. *Foresight and STI Governance*, 18(4), pp. 77–87. DOI: 10.17323/2500-2597.2024.4.77.87

Аэрокосмический сектор априори относится к тем стратегическим, высокотехнологичным индустриям, которые являются драйвером научно-технологического прогресса; к тому же он вносит существенный вклад в повышение возможностей мобильности общества. Отрасль состоит из трех основных промышленных сегментов: авиационного (производство самолетов и вертолетов), космического (создание космических аппаратов и платформ, оказание сопутствующих услуг) и оборонного (изготовление ракет, боевых самолетов, работа с другими авиационными и космическими технологиями, относящимися к военной сфере). Связанные с ней продукты и процессы отличаются повышенной сложностью. По степени продвинутой инноваций военный сегмент, как правило, опережает гражданский (Bravo-Mosquera et al., 2022).

В последние годы рассматриваемый сектор отличается динамичным развитием, на возникающих рынках открываются многочисленные возможности. Среди наиболее востребованных продуктов лидируют компактные спутники, способные всеохватно анализировать земную поверхность, обеспечивать коммуникации между сверхзащищенными серверами, широкополосную связь для гражданских и военных целей, функционирование глобального Интернета вещей¹. Цифровые технологии радикально преобразуют производственные модели, меняют способы предоставления услуг. По данным исследования Deloitte, посвященного Индустрии 4.0, 84% руководителей аэрокосмических и оборонных предприятий рассматривают новое поколение цифровых решений как одну из значимых сил в достижении конкурентных преимуществ². Для изучения их трансформационного потенциала и готовности отрасли к освоению более сложных технологий применяется оценка технологической зрелости (*technology maturity*).

Модели зрелости нуждаются в регулярном обновлении ввиду того, что они быстро устаревают, перестают соответствовать меняющимся реалиям, утрачивают свою практичность, становятся негибкими и неспособными предлагать действенные решения (Barata, Cunha, 2017). Исходя из этого, мы задались целью исследовать существующие способы оценки технологической зрелости в условиях Индустрии 4.0 и разработать новую модель, адаптированную к современному контексту, на примере компаний бразильского аэрокосмического сектора. После всестороннего обзора технологических трендов в мировом аэрокосмическом секторе мы перейдем к описанию бразильского контекста и затем к представлению модели технологической зрелости.

Трансформация мировой аэрокосмической индустрии

Аэрокосмический сектор эволюционирует в режиме, который в целом можно охарактеризовать как относитель-

но плавный, что, конечно, не исключает преодоления высоких уровней сложности и адаптивных напряжений. Благополучный динамичный климат вытекает из удачного сочетания разных факторов: прошлых наработок, постоянной и растущей востребованности услуг и продуктов мировыми рынками, стабильного притока заказов на инновационные разработки и т. п. Здесь концентрируются масштабные инвестиции (как государственные, так и частные), поддерживаются высокие стандарты подготовки персонала, производства, непрерывно вводятся инновации. Эти факторы способствуют наращиванию общего потенциала отрасли, но вместе с тем делают ее «подъемной» лишь для немногих стран³, во многом из-за такого ресурсоемкого аспекта, как исследования и разработки (ИиР), которые, по определению, требуют соответствующего исторического и компетентностного бэкграунда, солидной научной базы.

Аэрокосмическая промышленность становится все более наукоемкой, с растущими затратами на специализацию (Gkotsis, Vezzani, 2022). Патенты, ноу-хау и новые знания стимулируют трансформацию сектора, повышая конкурентоспособность его компаний. Наблюдается растущий спрос на продукцию, в частности на новые самолеты из-за увеличения числа перевозок (Deloitte, 2024). На фоне многих других секторов аэрокосмическая отрасль демонстрировала устойчивую позитивную динамику (World Bank, 2020). Стоимость экспорта промежуточных изделий росла примерно на 6% в год, увеличившись с 272 млрд долл. в 2007 г. до примерно 536 млрд долл. в 2018 г. (Caliari et al., 2023). Менялся и состав экспорта, поскольку выросла значимость промежуточных фаз производства (в частности, предварительной сборки) по отношению к конечным товарам. Этот тренд выражается в том, что страны, отличные от местоположения основных подрядчиков, все активнее вовлекаются в аэрокосмические цепочки и могут использовать свои инновационные и производственные мощности для приближения к конечным рынкам. Сохранить лидирующие позиции помогает ставка на экономию масштаба и интенсивные вложения в ИиР. В табл. 1 указаны ключевые игроки в аэрокосмической отрасли в соответствии с их оборотом. Большинство производств базируются в США и Европе, часть их деятельности связана с оборонным сектором. Объемы годовых инвестиций в ИиР у Airbus, Boeing и Raytheon Technologies Corporation намного выше превышают 2 млрд долл.

Важным активом в развитии производственных мощностей выступает национальная инновационная система (Alberti, Pizzurno, 2015). Улучшение делового и инвестиционного климата рассматривается как прерогатива политики государства, в задачи которого также входит стимулирование науки и инноваций (Lee, Yoon, 2015; McGuire, 2014). В формировании национального производственного, научного и технологического потенциала

¹ <https://www.boyden.com/media/aerospace-and-defence-industry-outlook-perspectives-on-future-6979750/>, дата обращения 21.05.2024.

² <https://www2.deloitte.com/th/en/pages/financial-services/articles/the-industry-4-paradoxes-the-challenge-of-digital-transformation-en.html>, дата обращения 18.06.2024.

³ К ключевым игрокам в аэрокосмической индустрии относятся, прежде всего, страны G7 (США, Япония, Германия, Франция, Великобритания, Канада, Италия), а также Китай и Россия.

Табл. 1. Ведущие компании в мировой аэрокосмической промышленности в 2020 г.

Компания	Страна	Годовой оборот (млн долл.)	Число сотрудников	Инвестиции в ИиР (млн долл.)	Интенсивность ИиР (%)***
Lockheed Martin Corp.	США	65 398.0	114 000	1157.2	1.8
Airbus	ЕС	61 409.0	131 349	3491.0	5.7
Boeing Company	США	58 656.0	141 000	2674.9	4.6
Raytheon Technologies Corp.	США	56,587.0	181 000	2683.8	4.7
General Dynamics Corp.	США	37 925.0	100 700	414.8	1.1
China ASIC Limited **	Китай	37 075.2	–	–	–
Northrop Grumman Corp.	США	36 799.0	97 000	–	–
Honeywell International Inc	США	32 637.0	103 000	–	–
Bae Systems Plc	Великобритания	26 161.0	81 000	283.8	1.1
Safran	Франция	21 635.0	78 892	1171.0	5.4
Thales	Франция	20 908.5	80 702	918.6	4.4
Leonardo SPA	Италия	17 060.4	49 882	1496.0	8.8
Rolls-Royce Holdings Plc	Великобритания	15 867.8	48 200	1305.8	8.2
Bombardier Inc	Канада	15 462.0	16 000	387.2	2.5
Parker Hannifin Corp.*	США	14 347.6	54 640	–	–
Avic Airborne System Co. Ltd.**	Китай	13 496.0	–	137.7	1.0
Textron Inc	США	11 651.0	33 000	575.9	4.9
L3 Technologies Inc **	США	10 244.0	31 000	–	–
«Алмаз-Антей»**	Россия	9657.0	–	–	–
Huntington Ingalls Industries **	США	8899.0	–	–	–

Примечания: По некоторым компаниям данные доступны за 2021 г. (*) или за 2019 г. (**). *** — Показатель интенсивности ИиР рассчитывается как доля вложений в ИиР в суммарном годовом обороте компании.

Источник: адаптировано авторами на основе (Caliari et al., 2023).

значительный вклад вносит фактор интеллектуальной собственности. Отмеченная ранее позитивная отраслевая динамика отражается в увеличении числа патентов. Так, за период 2007–2018 гг., по данным Патентного ведомства США (US Patents and Trademarks Office), оно выросло в четыре раза (с 2225 до 9494). Число патентных заявок увеличилось примерно на 20%, а число стран происхождения заявителей — с 36 до 63 (Caliari et al., 2023).

Однако, несмотря на описанную позитивную динамику спроса, обеспечивать его становится все сложнее. Одним из ограничительных факторов является нехватка высококвалифицированных специалистов, способных работать с более высокими уровнями сложности, как в технологическом, так и в управленческом измерении. Поэтому аэрокосмическим компаниям приходится жестко конкурировать с другими отраслями за ценные кадры. В частности, это касается такого нового и сложного явления, как переформатирование устоявшихся цепочек поставок, которое заслуживает отдельного внимания.

Меняющаяся природа цепочек поставок в аэрокосмической индустрии

Национальные правительства придают аэрокосмической индустрии высокий стратегический статус, рассматривая ее как один из драйверов технологического суверенитета. Однако продукция этого сектора настолько сложна, что даже развитые страны не способны обеспечить внутри себя полный цикл ее производства, а потому встраиваются в международные цепочки поставок, имеющие многоуровневую структуру (Landoni, Ogilvie, 2019). Чем ближе к потребителю располагается компания в це-

почке, тем более сложные, инновационно насыщенные решения ей требуются. Это подразумевает последовательную интеграцию основными подрядчиками компонентов и подсистем от специализированных поставщиков для производства конечных продуктов. Связь между конкурентоспособностью стран и их инновационными системами во многом зависит от специфики продукта. Как правило, значение инновационных возможностей возрастает при продвижении по цепочке создания стоимости от базовых компонентов к конечным продуктам, синтезирующим различные технологии.

Позиционирование государств на разных этапах цепочки все сильнее зависит от эффективности национальной инновационной системы. Прослеживается позитивная связь между качественными преимуществами последней и участием страны в самых сложных и ценных сегментах цепочек. Государства, в большей мере ориентированные на экспорт конечной продукции, также имеют более развитые и качественные инновационные системы.

Ключевой вызов для всех сегментов индустрии состоит в беспрецедентно сложной переконфигурации глобальных цепочек поставок. Как следствие, налаживание диверсификации делает этот процесс чрезвычайно проблематичным и одновременно безальтернативным. Появляются точки уязвимости, где могут возникать задержки с доставкой необходимых ресурсов, замедление производства, рост цен на материалы и т. п. Турбулентность отмечается на всех стадиях: от поставщиков сырья до производителей оборудования, полупроводников, микроэлектроники и других ключевых компонентов. Поиск сырья, особенно редкоземельных минералов как

основы для производства электроники, представляет серьезную проблему, так как их запасы концентрируются лишь в считаном числе стран. Альтернативы им в краткосрочной перспективе не прослеживаются. Таким образом, требуется особенная проницательность и изобретательность для гибкого комбинирования текущего производства с наращиванием стратегических ресурсов. Возникает новая модель трансграничных производственных отношений — френдшоринг⁴. Компаниям предоставляется возможность занять выгодную позицию в цепочке при условии, что они поддерживают стратегические запасы сырья, обеспечивают оптовые закупки товаров с длительным сроком поставки, налаживают альтернативные каналы снабжения. Как следствие, ставка делается на международные альянсы. Они открывают возможность крупным аэрокосмическим компаниям снизить издержки производства, в полной мере использовать технологии партнеров и оптимально распределять ресурсы, фокусируясь на производстве с высокой добавленной стоимостью, включая проектирование, сборку и маркетинг самолетов (Vamber et al., 2016; Niosi, Zhegu, 2005, 2010).

Авторы статьи (Caliari et al., 2023) проанализировали участие стран на разных этапах цепочек, используя данные об экспорте продукции разных уровней сложности, а также результативности их инновационных систем, опираясь на статистику патентов, зарегистрированных в США. Изучались данные по 38 странам за период 2007–2018 гг. Выявлена тесная связь между эффективностью инновационной системы и вовлеченностью в цепочки, прослежены особенности специализации стран на разных этапах. На стадиях с высокой добавленной стоимостью в цепочках присутствуют государства, инновационные системы которых в большей степени делают ставку на многообразие и высокое качество продукции, чем на количественные показатели. Следовательно, для сохранения конкурентоспособности необходимо наращивать вклад в модернизацию цепочек, совершенствовать национальную инновационную систему, интегрировать в нее разных субъектов, обновлять базу знаний. Ключевые подрядчики все заметнее сосредотачиваются на своей основной компетенции, делегируя большую ответственность крупным поставщикам по разделению рисков с соответствующим распределением доходов. Подавляющая часть второстепенных функций передается участникам, производящим менее сложную продукцию. Подобная структура управления позволяет органично связать разные этапы цепочки в последовательном наращивании добавленной стоимости. Основные подрядчики работают на всех этапах цепочки от ИиР и проектирования до предоставления высокоуровневого послепродажного обслуживания. Компании «низкой сложности» изготавливают запчасти, а предприятия «высокой сложности», расположенные ближе к конечному потребителю, формируют на них заказы (Caliari et al., 2022). Чем сложнее уровень производимой продукции, тем выше вклад компании в создание добавленной стоимости. Это является индикатором изменившейся природы аэрокосмических

цепочек, где на смену традиционной вертикально интегрированной и географически локализованной структуре приходит модель специализации с транслокальной иерархической структурой, распределенной по звеньям цепочки (Turkina et al., 2016). Связь инновационной активности с участием в цепочках зависит от двух основных факторов: дифференциации интеллектуальной собственности с точки зрения участников и технологий, а также от роли основных подрядчиков (Niosi, Zhegu, 2010). Ведущие страны, как правило, одновременно располагают достаточным числом основных подрядчиков и развитой инновационной системой (Landoni, Ogilvie, 2019; Robinson, Mazzucato, 2019). Прежде всего это касается США, Франции и Германии. Бразилия, хотя и занимает видные позиции на международной аэрокосмической арене, несмотря на наличие основного подрядчика мирового уровня (Embraer), все же не смогла использовать экономию масштаба и создать сеть сильных местных поставщиков, чтобы вывести инновационную систему на качественно новый уровень (Caliari, Ferreira, 2022). Странам, специализирующимся на сборочных узлах, также доступны разные траектории выхода в более сложные системы цепочек. Государства, не имеющие возможности сформировать полноценную инновационную систему, тем не менее могут извлечь преимущества из позиций своих компаний-поставщиков в этих цепочках и структуры их взаимоотношений с другими участниками (Cooke, Ehret, 2009; Rebolledo, Nollet, 2011). Всегда есть риск блокировки на начальных стадиях, препятствующей дальнейшему укреплению статуса в цепочке. Такие страны, как Мексика, Марокко и Филиппины, достигли заметного прогресса на этапе сборки узлов, но темпы их технологического развития оказались недостаточными для освоения более высоких уровней (Vamber et al., 2016). В отличие от них Сингапuru удалось нарастить конкурентные преимущества как в компонентах, так и в сборочных узлах, что позволило стране внести ощутимый вклад в формирование общего технологического потенциала отрасли и занять более выгодные позиции в глобальном аэрокосмическом секторе.

Иными словами, фрагментация международных цепочек позволила развивающимся странам наладить производство несложных продуктов, однако повышение их технологических возможностей для выхода на более сложные этапы стоимостной цепочки оказалось нерешаемой задачей. Правительствам этих государств необходимо осваивать управленческую амбидекстрию, одновременно наращивая собственный потенциал и извлекая возможности из участия в транснациональных цепочках, пересмотреть подходы к управлению интеллектуальной собственностью (Lema et al., 2019).

Технологии и материалы

Технологии. В свете задач управления цепочками поставок особую востребованность приобретают цифровые двойники, использование которых обеспечивает максимальную прозрачность и предсказуемость происходя-

⁴ От англ. *friendshoring* — охват сетей цепочек поставок, ограничивающийся союзниками и дружественными странами в целях минимизации потенциальных угроз для бизнес-процессов.

ских процессов. Другие важные направления — создание двигателей на альтернативном топливе, сверхзвуковых и гиперзвуковых самолетов, что обуславливает актуальность разработки новых, более легких и одновременно прочных материалов, уменьшающих вес летательных аппаратов, снижающих расход топлива и повышающих общую надежность. В оборонном сегменте возникающие геополитические вызовы и модернизация технологической базы стимулировали спрос на инновации следующего поколения. Например, в США разрабатываются истребители нового поколения, основанные на технологии адаптивных двигателей. На начальной стадии находятся разработки, обеспечивающие бесшумный полет на сверхзвуковых скоростях. Растет спрос на военные гиперзвуковые технологии и кибербезопасность.

Материалы. В производстве аэрокосмической техники преобладают высокопрочные композиты, сплавы титана, алюминия, углеродные армированные полимеры, которые продвинули отрасль во многих отношениях. Конструкционные материалы позволяют облегчить вес летательных аппаратов, экономить топливо (что стимулирует к увеличению объемов пассажирских и грузоперевозок), а отделочные — снижать уровень шума и вибрации, улучшать теплоизоляцию. Композитные материалы находятся на переднем крае аэрокосмических инноваций. Исследования в этой области касаются улучшения их свойств в сторону достижения сверхпрочности, гибкости и устойчивости к экстремальным условиям.

Революционный эффект для отрасли имело и аддитивное производство (3D-печать), благодаря которому облегчается изготовление деталей особо сложной формы, многократно сокращается общее время и число итераций производственного процесса, экономятся ресурсы.⁵

Следующее трансформационное направление — «умные» материалы, при изготовлении которых активно используются биомиметические принципы (воспроизведение свойств различных природных структур). Они обладают потенциалом к самовосстановлению, адаптации к изменяющимся погодным условиям и повышению функциональности. В них встраиваются многочисленные датчики, позволяющие контролировать структурную целостность, напряжение, температуру и другие критические параметры компонентов самолета в режиме реального времени. Глубокого проникновения в отрасль достигли искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение. С их помощью анализируются колоссальные массивы данных, выполняются сложные симуляции для выявления лучших вариантов конструкций. Таким образом, слияние умных материалов с прорывными технологиями выводит аэрокосмическую промышленность в сферу инноваций, которые ранее считались недостижимыми.

⁵ Например, заводу General Electric в Бразилии удалось сократить процесс изготовления некоторых деталей с двух месяцев до одного дня.

⁶ <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/spacetech-startups/>, дата обращения 16.07.2024.

⁷ <https://www.slingshot.space/news/slingshot-darpa-agatha-ai>, дата обращения 07.08.2024.

⁸ <https://latamfdi.com/aerospace-industry-in-brazil/>, дата обращения 12.08.2024.

«Космический бизнес»

Картина не была бы полной без упоминания основных направлений в аэрокосмической индустрии, где наиболее активно создаются новые компании. Здесь сконцентрировано свыше 60 тыс. патентов, реализуется более 10 тыс. грантовых проектов ИиР⁶, отмечается высокая инвестиционная активность, возглавляемая такими игроками, как Fidelity, Geely, BlackRock. Разрабатываются многоразовые ракеты-носители для дальнейшего снижения стоимости запуска ракет. Ожидается рост космических путешествий, в связи с чем возрастет актуальность системы управления космическим трафиком и развития клиринговых услуг в околоземном пространстве. Например, Slingshot Aerospace и DARPA совместно разрабатывают новую систему обнаружения аномальных спутников⁷. Она будет обслуживать несколько крупных спутниковых созвездий из более чем 10 тыс. космических аппаратов, формируемых международными правительственными и коммерческими космическими операторами. Система базируется на основе технологий машинного обучения с опорой на данные за более чем 60 лет, характеризуется высокой адаптивностью и масштабируемостью. Она обладает широким спектром потенциальных применений за пределами космической отрасли, например, в геномике, биомедицине, сельском хозяйстве, в управлении коммунальными услугами. Разрабатываются также новые системы космической связи на основе лазерных и квантовых технологий, обеспечивающие более высокую скорость передачи данных и их лучшую защищенность по сравнению с традиционными системами радиочастот.

Аэрокосмическая промышленность Бразилии

Бразилия входит в число немногих стран, обладающих развитой аэрокосмической промышленностью с хорошим потенциалом, имеющим стратегическое значение для национальной экономики. Здесь создаются рабочие места, стимулируются ИиР, генерируются экспортные поступления, что вносит значимый вклад в экономический рост и укрепление национальной безопасности. Данная сфера катализирует инновации и производство с высокой добавленной стоимостью, повышая конкурентоспособность страны.

Национальная аэрокосмическая компания Embraer (Empresa Brasileira de Aeronáutica) — один из ведущих мировых производителей региональных самолетов. Производит различные коммерческие, военные и служебные летательные аппараты, включая серию E-Jet. Военные самолеты (истребитель AMX и турбовинтовой самолет Super Tucano) экспортируются в развитые страны.⁸ В рамках национальной космической программы раз-

рабатываются спутники для проведения космических исследований, дистанционного зондирования Земли и обеспечения связи.

Решающую роль в развитии сектора играет национальный научно-технический комплекс. В инновационную экосистему входят правительство, армия, оборонная промышленность, финансирующие и образовательные учреждения, аккредитационные органы (Reis et al., 2021). Так, в 2023 г. Министерство науки, технологий и инноваций Бразилии (Ministry of Science, Technology and Innovation) выделило из Национального фонда научно-технологического развития (National Fund for Scientific and Technological Development) сумму в 1 млрд реалов (около 180 млн долл.) на пять приоритетных инновационных инициатив по разработке новых спутников, с привлечением университетов и научно-исследовательских институтов⁹. Планируется создать «Парк аэрокосмических технологий» (Aerospace Technology Park) для стимулирования отраслевой инновационной системы. Он будет функционировать по четырем ключевым областям: космос, оборона, аэромобильность и коммерческая авионавтика. Получат развитие передовые системы управления космическими полетами, воздушным трафиком, новые энергетические и двигательные технологии и кибербезопасность¹⁰.

Существенный вклад в развитие инноваций вносит внутристрановое партнерство между университетами, научно-исследовательскими институтами и промышленностью, а также участие в международных аэрокосмических программах. Бразилии удалось выстроить надежную цепочку поставок в рассматриваемой индустрии, включая производство компонентов и систем. Тем самым открываются перспективы полноценного раскрытия ее потенциала в ближайшие годы, в частности, за счет расширения доли рынка региональных самолетов, использования накопленного опыта в военной авиации и достижений в области космических технологий. Для того чтобы он реализовался, стране придется решать сверхсложную задачу подтягивания национальной инновационной системы, которая бы в полной мере поддержала усилия основного подрядчика мирового уровня Embraer, сформировав развитую сеть квалифицированных местных поставщиков.

Разработка модели технологической зрелости

Представленный обзор литературы содержит достаточную базу знаний для разработки модели технологической зрелости в Индустрии 4.0 и ее адаптации к аэрокосмическому сектору Бразилии¹¹. Понятие «зрелость»

характеризует возможность количественной оценки и присвоения определенного статуса в развитии той или иной технологии с точки зрения ее применимости в рассматриваемом секторе и степени «встроенности» в отраслевую стратегию (рис. 1)¹².

На рис. 2 отражена взаимосвязь между концепцией Индустрии 4.0, моделями зрелости и аэрокосмическим сектором. Перекрывающиеся круги — позиция расположения предлагаемого метода, отражающая его синтетическую природу. Этапы создания модели проиллюстрированы на рис. 3. Особое значение имела разработка реалистичной и надежной анкеты, поэтому помимо изучения литературы проводился опрос для получения обратной связи от специалистов из научной сферы и бизнеса.

Сравнивались разные модели зрелости, представленные в литературе. Были изучены их ключевые атрибуты и выявлены те, из которых должна состоять предлагаемая модель, включая полноту и содержательность оценочных вопросов, применимость к специфике рассматриваемого сектора и простоту использования.

На начальном этапе создания модели анализировались существующие концепции, имеющие отношение к аэрокосмическому сектору. Всего были выделены 35 измерений. Идентифицировались сходства между ними и возможности синтезирования в едином вопросе анкеты для оптимизации временных затрат респондентов. Выявилось, что в большинстве существующих моделей доминируют вопросы стратегического планирования и управления человеческими ресурсами. Исходя из этого, первое из двух базовых измерений нашей модели получило формулировку «Стратегия и люди». Стратегическая компонента закладывает потенциал для долгосрочного успеха, поскольку обеспечивает согласованное управление многообразием доступных ресурсов, процессов, инструментов, практик и поведенческих моделей (Heerkens, 2007). Человеческая составляющая имеет значение ввиду того, что с изменением рыночных потребностей и развитием технологий будут меняться требования к компетенциям (Bonilla et al., 2019). Вторым базовым измерением модели стала «Интеллектуальная фабрика» как специфический атрибут Индустрии 4.0. Под интеллектуальными фабриками понимается совокупность машин, подсистем и процессов по всей цепочке поставок, образующих взаимосвязанную экосистему на основе передовых технологий, таких как ИИ, машинное обучение, аналитика больших данных, Интернет вещей, робототехника. Блок вопросов по первому измерению содержит 19 вопросов, второй — 16 (см. Приложение).

Затем мы перешли к определению оценочных критериев. Для конвертации ответов в количественную балль-

⁹ <https://www.gov.br/aeb/pt-br/assuntos/noticias/empresas-brasileiras-celebram-investimento-de-r-1-bilhao-para-inovacao-no-setor-espacial>, дата обращения 24.09.2024.

¹⁰ <https://gizmodo.uol.com.br/brasil-vai-ganhar-novo-parque-aeroespacial-veja-o-que-ja-se-sabe/>, дата обращения 24.09.2024.

¹¹ Результаты поиска по Web of Science, проводившегося нами в начале 2023 г. по ключевым словам «Industry 4.0» и «maturity», отображали 409 записей. В 2015 г. (начало периода наблюдения) вышли всего четыре релевантные публикации. Далее динамика нарастала, и в 2022 г. появилось 116 статей. Для сравнения — общее число работ, посвященных Индустрии 4.0 как таковой, находится на уровне 26 000. Таким образом, доля публикаций, фокусирующихся непосредственно на вопросах технологической зрелости в контексте Индустрии 4.0, составляет мизерные 1.6%.

¹² <https://www.industria40.ind.br/artigo/19931-maturidade-para-industria-40-avaliacao-quantitativa-e-qualitativa-do-nivel-de-tecnologia-gestao-e-pessoas-para-implantacao-da-digitalizacao>, дата обращения 24.09.2024.

Табл. 2. Примеры вопросов анкеты с вариантами ответа

Вопрос	Варианты ответа
9 – Есть ли у вашей организации дорожная карта по развитию в условиях Индустрии 4.0	А. Нет В. Для реализации требуются предварительные исследования С. Уже имплементируется D. Применяется в некоторых проектах E. Да
10 – Основываются ли принимаемые в организации решения на объективных данных?	А. Нет В. Отдельные решения С. Половина принимаемых решений D. Более половины решений E. Все решения

Источник: составлено авторами.

ную оценку в моделях зрелости чаще всего используется шкала Лайкерта¹³. Был принят пятибалльный вариант шкалы, с выделением следующих уровней владения технологиями: 1 — «новичок» (beginner), 2 — «ученик» (learner), 3 — «средняк» (intermediate), 4 — «специалист», 5 — «топ-специалист». Уровень зрелости компании рассчитывается как средний показатель этих величин (рис. 4).

Созданная нами модель зрелости реализована в виде онлайн-инструментов — анкеты с вопросами по двум измерениям («Стратегии и люди» и «Умная фабрика»), калькулятора и панели мониторинга.

Анкетирование начинается со сбора данных об эксперте и его организации для выработки системой адаптированного сценария по анализу ответов анкеты, их адресному направлению и получению обратной связи (пример приведен в табл. 2). Далее формируется панель для инструментов, призванная отобразить все ключевые показатели, полученные по анализу анкет, на одном экране (Few, 2006). Уровень владения той или иной технологией оценивается по пятибалльной шкале — от «новичка» до «топ-специалиста». Вторая часть панели мони-

Рис. 1. Степень технологической зрелости



Рис. 2. Диаграмма Венна



Рис. 3. Этапы построения модели



Рис. 4. Расчет среднего уровня

Вопрос	Значение
Вопрос 1	5
Вопрос 2	3
Вопрос 3	2
Вопрос 4	1
Вопрос 5	2
Сумма значений	13
Число вопросов	5
Расчет среднего	13/5
Среднее	2.6

Общее число вопросов = 5
Сумма всех вопросов $5+3+2+1+2 = 13$
Сумма значений
Общее число вопросов

Источник: составлено авторами.

¹³ См., например, работы (Schumacher et al., 2016; Xavier et al., 2020), посвященные модели зрелости в области бизнес-разведки (Business Intelligence Maturity Model), принятой в Hewlett-Packard.

торинга содержит многообразные визуализации (в виде радаров, древовидных структур, столбчатой и круговой диаграмм), которые отражают текущую картину со степенью освоенности организацией тех или иных технологий (см. пример на рис. 5).

Древовидные карты дают возможность изучения и выбора наиболее оптимального варианта управления этими активами из многообразия доступных методологий (например, Scrum, «бережливое производство», «канбан», «кристалльная семья», гибридные методики). В целом панель данных способна гибко настраиваться и отображать уровень зрелости компании — как обобщенно, так и по отдельным аспектам. Предусмотрена «светофорная градация» при визуализации оценочных показателей, показывающая, какие из аспектов нуждаются в большем внимании. Для внедрения представленного инструмента в бразильский аэрокосмический сектор составляющим его компаниям были разосланы приглашения к пилотному тестированию. Ответы получены от 20% организаций. Результаты представлены в табл. 3. Можно увидеть, что ни по одному из аспектов, в соответствии с вопросами анкеты, компании не достигли даже среднего уровня компетенций. Самый низкий уровень (новичка) наблюдается в отношении технологического мониторинга, автономных роботов, ИИ, предиктивного анализа и цифровых двойников (все они входят в измерение «Умная фабрика»).

Заключение

Как и большинство секторов, аэрокосмическая индустрия трансформируется и модернизируется за счет освоения новых производственных технологий и методов управления. Учитывая первоочередную потребность рассматриваемого сектора в передовых технологиях для обеспечения максимального качества и надежности своей продукции, все его компании оказались среди первых перед вызовами освоения технологий Индустрии 4.0. Для эффективного управления этими процессами созда-

Табл. 3. Результаты опроса

Компоненты	Значение	Уровень владения
Стратегия и люди		
Реализация стратегии	2.3	Ученик
Партнерство	2.2	Ученик
Инвестиции	2.7	Ученик
Анализ данных	2.3	Ученик
Навыки сотрудников	2.5	Ученик
Направления развития	2.3	Ученик
Показатели	2.2	Ученик
Дорожная карта	2.7	Ученик
Принятие решений с использованием данных	2.7	Ученик
Agile методологии	2.5	Ученик
Многодисциплинарные команды	2.7	Ученик
Непрерывное совершенствование	2.3	Ученик
Управление инновациями	2.3	Ученик
Нулевое использование бумаги в документообороте	2.3	Ученик
Технологический контроль	1.5	Новичок
Организационное управление	2.3	Ученик
Умная фабрика		
Облако	2.5	Ученик
Аналитика данных	2.3	Ученик
Кибербезопасность	2.5	Ученик
Моделирование	2.2	Ученик
Искусственный интеллект	1.5	Новичок
Совместное использование данных	2.4	Ученик
Предиктивный анализ	1.5	Новичок
3D-печать	2.4	Ученик
Оборудование	1.5	Ученик
Виртуальная/дополнительная реальность	2.7	Ученик
Автономные роботы	2	Новичок
Интернет вещей	2	Ученик
Анализ в реальном времени	2.5	Ученик
Программное обеспечение	2	Ученик
Цифровые двойники	1.5	Новичок
Среднее по обоим измерениям	2.23	УЧЕНИК

Источник: составлено авторами.

Рис. 5. Радарная диаграмма



Источник: составлено авторами.

ются модели оценки технологической зрелости. Целями данного исследования являлись разработка подобного инструмента применительно к специфике аэрокосмического сектора Бразилии и его пилотное тестирование организациями. По данным за 2019 г., адаптированными к Индустрии 4.0 могли считаться только 4% отраслей национальной экономики (FIESP, 2019). В отношении собственно аэрокосмической промышленности наше пилотное анкетирование компаний показало, что по большинству аспектов их можно считать «учениками» (среднее значение уровня — 2.23). По отдельным аспектам, в основном касающимся именно технологий Индустрии 4.0, констатирован только стартовый уровень зрелости, следовательно, существует неотложная необходимость его повышения. Для этого существует достаточный потенциал, поскольку Бразилия занимает второе место по числу публикаций о готовности к Индустрии 4.0, а также

располагает наибольшим количеством стартапов среди всех стран Латинской Америки. На основе сказанного выше можно заключить, что страна достаточно динамично движется к развитию Индустрии 4.0, однако необходимы определенные инструменты, способствующие повышению уровня зрелости.

Наше исследование можно рассматривать только как начальный вклад в понимание степени готовности бразильского аэрокосмического сектора по отношению к технологиям Индустрии 4.0 и перспектив его повышения. В этом направлении требуется непрерывная и углубленная экспертная работа с учетом новейших научно-технологических достижений. Интерес к процессу оценки технологической зрелости в Бразилии растет, в том числе со стороны компаний и университетов, относящихся к рассматриваемому сектору, что обуславливает актуальность разработанной нами модели.

Библиография

- Alberti F.G., Pizzurno E. (2015) Knowledge exchanges in innovation networks: Evidences from an Italian aerospace cluster. *Competitiveness Review*, 25(3), 258–287. <https://doi.org/10.1108/CR-01-2015-0004>
- Bamber P., Gereffi G., Frederick S., Guinn A. (2016) *Costa Rica in the Aerospace Global Value Chain: Opportunities for Entry & Upgrade*, Durham, NC: Duke Center on Globalization, Governance & Competitiveness.
- Barata J., Cunha P.R. (2017) *Climbing the maturity ladder in industry 4.0: A framework for diagnosis and action that combines national and sectoral strategies*. Paper presented at the 23rd Americas Conference on Information Systems, Boston, United States 10–12 August 2017.
- Bonilla S.H., Silva H.R., Silva M.T., Franco G.R., Sacomano J.B. (2018) Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, 10(10), 3740. <https://doi.org/10.3390/su10103740>
- Bravo-Mosquera P.D., Catalano F.M., Zingg D.W. (2022) Unconventional aircraft for civil aviation: A review of concepts and design methodologies. *Progress in Aerospace Sciences*, 131, 100813. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100813>
- Calliari T., Ferreira M.J.B. (2022) The historical evolution of the Brazilian aeronautical sector: A combined approach based on mission-oriented innovation policy (MOIP) and sectoral innovation system (SIS). *Economics of Innovation and New Technology*, 32(5), 682–699. <https://doi.org/10.1080/10438599.2021.2011258>
- Calliari T., Ribeiro L.C., Pietrobelli C., Vezzani A. (2023) Global value chains and sectoral innovation systems: An analysis of the aerospace industry. *Structural Change and Economic Dynamics*, 65, 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2023.02.004>
- Cooke P., Ehret O. (2009) Proximity and procurement: A study of agglomeration in the Welsh aerospace industry. *European Planning Studies*, 17(4), 549–567. <https://doi.org/10.1080/09654310802682115>
- Deloitte (2024) *2024 Aerospace and Defense Industry Outlook*, London: Deloitte. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/aerospace-defense/aerospace-and-defense-industry-outlook.html>
- Few S. (2006), Stephen. *Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data*. 223p, 2006. North Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc.
- FIESP (2019) *Sondagem Fiesp de Indústria 4.0*, São Paulo: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo.
- Gkotsis P., Vezzani A. (2022) The price tag of technologies and the ‘unobserved’ R&D capabilities of firms. *Economics of Innovation and New Technology*, 31(5), 339–361. <https://doi.org/10.1080/10438599.2020.1799141>
- Heerkens G. (2007) *Introducing the revolutionary strategic project management maturity model (SPM3)*. Paper presented at Project Management Institute (PMI) Global Congress 2007, North America, Atlanta, GA.
- Landoni M., Ogilvie D.T. (2019) Convergence of innovation policies in the European aerospace industry (1960–2000). *Technological Forecasting and Social Change*, 147, 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.07.007>
- Lee J.J., Yoon H.A. (2015) Comparative study of technological learning and organizational capability development in complex products systems: Distinctive paths of three latecomers in military aircraft industry. *Research Policy*, 44(7), 1296–1313. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.03.007>
- Lema R., Pietrobelli C., Rabelotti R. (2019) Innovation in global value chains. In: *Handbook On Global Value Chains* (eds. S. Ponte, G. Gereffi, G. Raj-Reichert), Cheltenham: Edward Elgar Publishing, pp. 370–384.
- McGuire S. (2014) Global value chains and state support in the aircraft industry. *Business and Politics*, 16(4), 615–639. <https://doi.org/10.1515/bap-2014-0014>
- Niosi J., Zhegu M. (2005) Aerospace clusters: Local or global knowledge spillovers? *Industry and Innovation*, 12(1), 5–29. <https://doi.org/10.1080/1366271042000339049>
- Niosi J., Zhegu M. (2010) Multinational corporations, value chains and knowledge spillovers in the global aircraft industry. *Institutions and Economics*, 2(2), 109–141.
- Rebolledo C., Nollet J. (2011) Learning from suppliers in the aerospace industry. *International Journal of Production Economics*, 129 (2), 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.008>
- Reis M., Wehmann C., Martinez M., Reis P. (2021) Mapeamento Patenteiro Sobre as Tecnologias Aeroespaciais das Instituições de Pesquisa e das Empresas Brasileiras. *Cadernos de Prospecção*, 14(4), 1219–1235. <https://doi.org/10.9771/cp.v14i4.42426>
- Robinson D.K.R., Mazzucato M. (2019) The evolution of mission-oriented policies: Exploring changing market creating policies in the US and European space sector. *Research Policy*, 48(4), 936–948. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.10.005>
- Schumacher A., Erol S., Sih W. (2016) A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Proceedia CIRP*, 52, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Soni R., Verma R., Garg R.K., Sharma V. (2023) A critical review of recent advances in the aerospace materials. *Materials Today: Proceedings*, 12.08.2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.108>
- Turkina E., van Assche A., Kali R. (2016) Structure and evolution of global cluster networks: Evidence from the aerospace industry. *Journal of Economic Geography*, 16(6), 1211–1234. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbw020>
- World Bank (2020) *World Development Report 2020: Trading for Development in the Age of Global Value Chains*, Washington, D.C.: World Bank.
- Xavier A., Reyes T., Aoussat A., Luiz L., Souza L. (2020) Eco-innovation maturity model: A framework to support the evolution of eco-innovation integration in companies. *Sustainability*, 12(9), 3773. <https://doi.org/10.3390/su12093773>

Приложение 1. Вопросы анкеты

1. Измерение «Стратегия и люди»

- 1 — Как бы вы описали ход реализации стратегии Индустрии 4.0 в организации?
- 2 — Есть ли у организации партнеры, поощряющие развитие в сфере Индустрии 4.0?
- 3 — Инвестирует ли организация в эти технологии?
- 4 — В каких областях сотрудники обладают навыками, необходимыми для Индустрии 4.0?
- 5 — Насколько значимо использование аналитики данных?
- 6 — Какую долю ресурсов в процентах необходимо выделить для разработки проектов в рамках Индустрии 4.0?
- 7 — Предпринимаются ли какие-либо действия для приобретения недостающих навыков (проведение учебных курсов, семинаров и т. д.)?
- 8 — Используются ли индикаторы и графики для внедрения Индустрии 4.0?
- 9 — Была ли создана дорожная карта для достижения целей перехода к Индустрии 4.0?
- 10 — Принимает ли организация решения на основе ориентации на данные?
- 11 — Используется ли какая-либо методология гибкого управления?
- 12 — Являются ли коллективы организационных подразделений многопрофильными?
- 13 — Используется ли в проекте какая-либо методология непрерывного совершенствования?
- 14 — Применяются ли в организации инструменты управления инновациями?
- 15 — Практикуется ли концепция «нулевого использования бумаги» для сбора данных, документационного оборота и т. д.?
- 16 — Знакома ли организация с концепцией «технологического мониторинга»?
- 17 — Реализуются ли проекты в партнерстве с университетами, бизнесом, государственными ведомствами и т. д.?
- 18 — Какую оценку вы бы поставили по шкале от 1 до 5 в отношении паттернов руководства в вашей организации по следующим четырем измерениям: «принятие решений на основе данных»; «драйвер трансформаций»; «управление человеческими ресурсами»; «социальная ориентация»?
- 19 — Имеют ли сотрудники автономию в выполнении своих функций, свободу высказывать собственное мнение и инициировать преобразования?

2. Измерение «Умная фабрика»

Какие из перечисленных технологий используются в организации и насколько интенсивно?

- 1 — 3D-принтеры
- 2 — Облачные сервисы
- 3 — Цифровизация оборудования (датчики, подключение к Интернету вещей, цифровой мониторинг, управление, оптимизация и автоматизация)
- 4 — Аналитика (автономная проверка) данных
- 5 — Технологии виртуальной и/или дополненной реальности
- 6 — Сервисы кибербезопасности
- 7 — Автономные роботы
- 8 — Адаптивное роботизированное моделирование
- 9 — Управление данными и их анализ в режиме реального времени
- 10 — Искусственный интеллект
- 11 — Интернет вещей
- 12 — Обмен данными между работниками и машинами в режиме реального времени
- 13 — Интеграция обмена информацией между организационными подразделениями
- 14 — Автоматизированные системы управления (например, для планирования производства, автоматизированного проектирования, управления жизненным циклом продукции)
- 15 — Предиктивная аналитика
- 16 — Цифровые двойники

* У респондентов есть возможность выбора нескольких вариантов ответа.

Источник: составлено авторами.