

CHƯƠNG 2

VẬN DỤNG CÁC TRỤ CỘT CỦA NHÀ MÁY THÔNG MINH TRONG SẢN XUẤT

M.Econ. Đặng Thiệu Tâm

ĐỊNH HƯỚNG CHƯƠNG 2

Nếu Chương 1 trả lời câu hỏi *nhà máy thông minh là gì và được đo bằng cái gì*, thì Chương 2 trả lời câu hỏi *nó được cấu thành từ những gì, các thành phần đó liên kết với nhau ra sao, và nhà quản trị dựa vào đâu để quyết định đầu tư vào thành phần nào trước*. Trọng tâm của chương không phải là mô tả kỹ thuật từng công nghệ, vốn là công việc của kỹ sư, mà là trang bị cho người học năng lực **thẩm định quản trị** đối với từng nhóm công nghệ.

Chương được tổ chức theo bốn lớp lập luận nối tiếp nhau. **Lớp thứ nhất**, gồm mục 2.1 và mục 2.2, thiết lập công cụ tư duy: khung thẩm định bốn bước áp dụng thống nhất cho mọi trụ cột, bản đồ chín trụ cột cùng ba giới hạn của bản thân bản đồ đó, và khung định vị trường hợp sử dụng cho phép chuyển từ ngôn ngữ công nghệ sang ngôn ngữ bài toán vận hành.

Lớp thứ hai, gồm mục 2.3 và mục 2.4, trình bày điều kiện kỹ thuật nền: kiến trúc dữ liệu bốn lớp của nhà máy kết nối, và ba chiều tích hợp cùng sáu dạng thất bại tích hợp điển hình. Đây là phần giải thích vì sao đa số dự án thất bại ở khâu ghép nối chứ không ở công nghệ đơn lẻ.

Lớp thứ ba, gồm các mục từ 2.5 đến 2.9, đi sâu vào năm cụm công nghệ có tác động vận hành trực tiếp nhất: bản sao số; sản xuất bồi đắp và thực tại mở rộng; phổ tự động hóa; robot cùng ứng dụng cộng tác; và hệ thống điều hành sản xuất. Mỗi cụm đều gắn với một bài toán quyết định đầu tư có tính định lượng, vì năng lực lập luận chứng kinh tế mới là điều phân biệt nhà quản trị với người sử dụng công nghệ.

Lớp thứ tư, gồm các mục từ 2.10 đến 2.12, xử lý ba điều kiện nền mà nếu thiếu thì mọi trụ cột đều không bền vững: nguyên lý tinh gọn 4.0; an ninh mạng công nghiệp cùng quản trị dữ liệu trong khung pháp lý Việt Nam; và con người, nội dung trọng tâm của Công nghiệp 5.0. Mục 2.13 tổng hợp toàn bộ chương thành một lộ trình bốn giai đoạn.

So với các tài liệu cùng chủ đề, phiên bản này bổ sung **sáu quy trình chuẩn hóa kèm sơ đồ**: quy trình bảy bước đưa dữ liệu từ hiện trường tới bản sao số, quy trình sáu bước thẩm định một đề xuất công nghệ, quy trình sáu bước xây dựng và duy trì một bản sao số, quy trình bảy bước triển khai ứng dụng cộng tác an toàn, quy trình sáu bước triển khai hệ thống điều hành sản xuất, và quy trình sáu bước xây dựng chương trình an ninh mạng công nghiệp. Chương khép lại bằng nguyên tắc nền tảng của tinh gọn 4.0: *ổn định trước, số hóa sau*, bởi số hóa một quy trình lãng phí chỉ tạo ra lãng phí nhanh hơn.

MỤC TIÊU HỌC TẬP CỦA CHƯƠNG 2

Sau khi học xong chương này, người học có thể:

1. **Vận dụng** được khung thẩm định bốn bước để phân tích bất kỳ đề xuất công nghệ nào theo cơ chế tạo giá trị, điều kiện áp dụng, giới hạn và luận chứng kinh tế.
2. **Mô tả** được chín trụ cột công nghệ của nhà máy thông minh và **đánh giá** được ba giới hạn của bản thân khung chín trụ cột.
3. **Phân tích** được tác động của từng trụ cột lên bốn mục tiêu cạnh tranh vận hành thông qua ma trận trụ cột và mục tiêu.
4. **Định vị** được một trường hợp sử dụng cụ thể trên hai chiều gồm giai đoạn quy trình và mức độ tiên liệu phân tích.
5. **Trình bày** được kiến trúc bốn lớp của hệ thống IoT công nghiệp và **giải thích** được tiêu chí phân bổ tải xử lý giữa biên và đám mây.
6. **Thực hiện** được quy trình bảy bước đưa dữ liệu từ hiện trường tới bản sao số và **chỉ ra** hậu quả khi bỏ qua bước chuẩn hóa ngữ cảnh.
7. **Phân biệt** được tích hợp theo chiều dọc, chiều ngang và theo vòng đời; **giải thích** được vì sao phần lớn dự án thất bại ở khâu tích hợp.
8. **Thực hiện** được quy trình sáu bước thẩm định một đề xuất công nghệ và **xác định** được điểm loại bỏ của từng đề xuất.
9. **Phân biệt** được mô hình số, bóng số và bản sao số; **xác định** được năm điều kiện dữ liệu để một bản sao số có giá trị vận hành.
10. **Xác định** được mức tự động hóa phù hợp bằng ma trận sản lượng và đa dạng sản phẩm, đồng thời **nhận diện** được bảy tự động hóa quá mức.
11. **Tính toán** được thời gian hoàn vốn cùng giá trị hiện tại ròng của một dự án ứng dụng cộng tác và **chỉ ra** biến số quyết định tính khả thi.
12. **Vận dụng** được quy trình bảy bước đánh giá rủi ro cho một ứng dụng cộng tác theo tinh thần ISO 10218 phiên bản 2025.
13. **Giải thích** được mười một chức năng của MES theo khung MESA và **phân vai** được ERP, APS, MES cùng SCADA theo chu kỳ quyết định.
14. **Vận dụng** được nguyên tắc tinh gọn 4.0 để đánh giá một đề xuất số hóa và **lập luận** cho nguyên tắc ổn định trước, số hóa sau.
15. **Trình bày** được nguyên tắc phòng vệ nhiều lớp theo IEC 62443 và **liên hệ** khung pháp lý Việt Nam về dữ liệu.
16. **Xây dựng** được ma trận kỹ năng cho người vận hành thế hệ mới và **đề xuất** chiến lược nâng cấp kỹ năng.

17. **Tổng hợp** được lộ trình bốn giai đoạn tích hợp các trụ cột công nghệ cho một nhà máy cụ thể.

Chương 2 đáp ứng CLO.1 và CLO.2, ở mức Bloom từ Hiểu đến Phân tích và bước đầu chạm tới mức Đánh giá.

Bảng 2.1. Một số thuật ngữ nền tảng của Chương 2

Thuật ngữ tiếng Việt	Thuật ngữ tiếng Anh	Ý nghĩa ngắn gọn
Trường hợp sử dụng	Use case	Một ứng dụng cụ thể của công nghệ số vào một bài toán vận hành xác định, có đầu vào, đầu ra và chỉ số đo lường rõ ràng.
Mức độ tiên liệu phân tích	Degree of analytical foresight	Thang phân loại năng lực phân tích dữ liệu, đi từ mô tả, chẩn đoán, dự báo tới khuyến nghị và tự chủ.
Tích hợp theo chiều dọc	Vertical integration	Liên thông dữ liệu từ cảm biến hiện trường lên tới hệ thống hoạch định doanh nghiệp trong nội bộ.
Tích hợp theo chiều ngang	Horizontal integration	Liên thông dữ liệu xuyên suốt nhà cung cấp, nhà máy và khách hàng trong mạng lưới giá trị.
Tích hợp theo vòng đời	End to end engineering	Chuỗi dữ liệu liên tục từ thiết kế, sản xuất, sử dụng cho tới thải bỏ sản phẩm.
Điện toán biên	Edge computing	Việc xử lý dữ liệu ngay gần nguồn phát sinh nhằm giảm độ trễ và giảm lưu lượng truyền về trung tâm.
Bản sao số	Digital twin	Mô hình số của một thực thể vật lý, được đồng bộ dữ liệu hai chiều và tự động theo thời gian thực.
Bóng số	Digital shadow	Mô hình số nhận dữ liệu tự động từ thực thể vật lý nhưng phản hồi ngược lại vẫn do con người thực hiện.
Vỏ quản trị tài sản	Asset Administration Shell	Chuẩn mô tả thống nhất một tài sản công nghiệp dưới dạng số, cho phép ghép nối bản sao số từ nhiều nhà cung cấp.
Sản xuất bồi đắp	Additive manufacturing	Chế tạo bằng cách bồi đắp vật liệu theo từng lớp thay vì cắt gọt từ phôi.
Ứng dụng cộng tác	Collaborative application	Ứng dụng robot làm việc chung không gian với người, không cần rào chắn cố định, dựa trên giới hạn lực, tốc độ và khoảng cách.

Thuật ngữ tiếng Việt	Thuật ngữ tiếng Anh	Ý nghĩa ngắn gọn
Hệ thống điều hành sản xuất	MES và MOM	Lớp hệ thống điều hành và giám sát hoạt động sản xuất, nằm giữa ERP và SCADA.
Hội tụ công nghệ thông tin và công nghệ vận hành	IT and OT convergence	Việc kết nối hệ thống công nghệ thông tin với hệ thống công nghệ vận hành trong nhà máy.
Phân vùng và ống dẫn	Zones and conduits	Nguyên tắc phân tách mạng công nghiệp thành các vùng an ninh và kiểm soát luồng dữ liệu giữa chúng theo IEC 62443.
Người vận hành thế hệ mới	Operator 4.0 và Operator 5.0	Người lao động được công nghệ tăng cường năng lực, giữ vai trò ra quyết định và giám sát hệ thống.
Tinh gọn 4.0	Lean 4.0	Việc số hóa và tăng cường các công cụ sản xuất tinh gọn bằng dữ liệu thời gian thực.

2.1. Dẫn nhập: từ danh mục công nghệ tới năng lực vận hành

2.1.1. Ba sai lầm nhận thức phổ biến trước khi bàn về công nghệ

Chương 1 đã xác lập rằng nhà máy thông minh là một trạng thái năng lực chứ không phải một danh mục thiết bị. Tuy nhiên, năng lực đó phải được hiện thực hóa bằng những công nghệ cụ thể, và mỗi công nghệ đều đi kèm chi phí, điều kiện áp dụng cùng rủi ro riêng. Vấn đề đặt ra cho nhà quản trị vì thế không phải là công nghệ nào tiên tiến nhất, mà là tổ hợp công nghệ nào phù hợp với bài toán vận hành, mức trưởng thành và cấu trúc kinh tế của nhà máy cụ thể đang xét.

Thực tiễn triển khai cho thấy ba sai lầm nhận thức lặp lại với tần suất cao, và cả ba đều xuất hiện trước khi bất kỳ hợp đồng nào được ký.

Sai lầm thứ nhất là tư duy danh mục. Doanh nghiệp lập danh sách chín hoặc mười công nghệ của Công nghiệp 4.0 rồi lần lượt đầu tư từng hạng mục, mỗi hạng mục do một nhà cung cấp khác nhau triển khai, mỗi hệ thống có cơ sở dữ liệu riêng. Kết quả là một nhà máy sở hữu đầy đủ công nghệ nhưng không có năng lực thông minh, vì các mảnh ghép không nói chuyện được với nhau. Đây chính là lý do chương này dành trọn hai mục cho kiến trúc dữ liệu và logic tích hợp trước khi đi vào từng công nghệ cụ thể: tích hợp không phải là bước cuối cùng của dự án mà là ràng buộc thiết kế phải được đặt ra ngay từ bước đầu tiên.

Sai lầm thứ hai là tư duy công cụ. Doanh nghiệp mặc định rằng một công nghệ có giá trị nội tại, độc lập với bối cảnh sử dụng. Trên thực tế, giá trị của một công nghệ là hàm số của bài toán vận hành, không phải thuộc tính cố hữu của công nghệ đó. Bản sao số toàn hệ thống mang lại giá trị lớn cho một nhà máy hóa dầu vận hành liên tục với chi phí dừng máy rất cao, nhưng có thể là

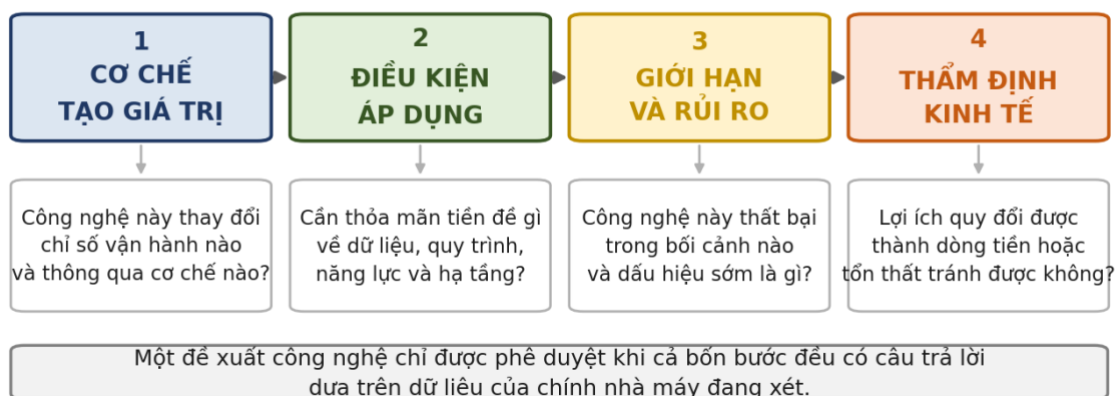
khoản đầu tư lãng phí đối với một xưởng may gia công theo đơn hàng, nơi bài toán thực sự nằm ở cân bằng chuyên và thời gian chuyển đổi mẫu.

Sai lầm thứ ba là tư duy dự án. Doanh nghiệp coi chuyển đổi số là một dự án có ngày kết thúc, thay vì coi đó là một năng lực phải được duy trì. Hệ quả trực tiếp là ngân sách chỉ bao gồm chi phí đầu tư ban đầu mà bỏ qua chi phí duy trì mô hình, chi phí cập nhật nội dung số, chi phí đào tạo lại nhân sự và chi phí vận hành chương trình an ninh mạng. Ba loại chi phí này cộng lại thường vượt xa phần đầu tư ban đầu trong vòng đời năm năm của hệ thống.

2.1.2. Khung thẩm định bốn bước dùng thống nhất trong toàn chương

Để loại trừ đồng thời cả ba sai lầm trên, mọi phần trình bày trong chương này đều được cấu trúc theo cùng một logic gồm bốn bước. Người học cần coi đây là công cụ làm việc chứ không phải một sơ đồ trang trí: mỗi khi gặp một đề xuất công nghệ trong thực tế, bốn câu hỏi này phải được trả lời trước khi bàn tới giá.

KHUNG THẨM ĐỊNH BỐN BƯỚC ÁP DỤNG CHO MỌI TRỤ CỘT CÔNG NGHỆ



Hình 2.1. Khung thẩm định bốn bước áp dụng cho mọi trụ cột công nghệ

Nguồn: Tác giả xây dựng.

Bước một, cơ chế tạo giá trị. Câu hỏi cần trả lời là công nghệ này làm thay đổi chỉ số vận hành nào và thông qua cơ chế nhân quả nào. Một đề xuất chỉ nêu được lợi ích chung chung như nâng cao hiệu quả hoặc tăng năng suất mà không chỉ ra được chỉ số cụ thể thì chưa đủ điều kiện để bàn tiếp.

Bước hai, điều kiện áp dụng. Mỗi công nghệ đều có tiền đề bắt buộc về dữ liệu, quy trình, năng lực con người và hạ tầng. Thiếu một tiền đề mà không có phương án bù đắp thì lợi ích kỳ vọng sẽ không hiện thực hóa, dù công nghệ được cài đặt đúng kỹ thuật.

Bước ba, giới hạn và rủi ro. Câu hỏi cần trả lời là công nghệ này thất bại trong bối cảnh nào, dấu hiệu nhận biết sớm là gì, và nhà máy sẽ nhận ra thất bại sau bao lâu. Một đề xuất không nêu được điều kiện thất bại của chính nó là một đề xuất chưa được thẩm định.

Bước bốn, thẩm định kinh tế. Lợi ích phải quy đổi được thành dòng tiền tiết kiệm, doanh thu tăng thêm hoặc tổn thất kỳ vọng tránh được. Riêng nhóm đầu tư an ninh mạng và an toàn lao động phải được thẩm định theo logic tổn thất kỳ vọng tránh được thay vì logic lợi ích tăng thêm, vì chúng gần như không cải thiện chỉ số nào trong điều kiện vận hành bình thường nhưng bảo vệ toàn bộ giá trị mà các trụ cột khác tạo ra.



2.2. Chín trụ cột công nghệ: bản đồ và giới hạn của bản đồ

2.2.1. Nguồn gốc và ba giới hạn của khung chín trụ cột

Khung chín trụ cột công nghệ của Công nghiệp 4.0 được phổ biến rộng rãi từ các báo cáo tư vấn công nghiệp giữa thập niên 2010 và đã trở thành ngôn ngữ chung trong đào tạo cũng như hoạch định. Ưu điểm của khung là tính bao quát và dễ truyền đạt. Tuy nhiên, người học cần nhận thức rõ ba giới hạn của nó trước khi sử dụng.

Thứ nhất, khung này là một phân loại theo công nghệ chứ không theo bài toán quản trị. Một doanh nghiệp không gặp vấn đề thiếu điện toán đám mây; doanh nghiệp gặp vấn đề thời gian chờ dài, tỷ lệ lỗi cao hoặc thiết bị dừng nhiều. Vì vậy khung chín trụ cột phải được sử dụng như một danh mục phương án, không phải một danh mục nhiệm vụ. Mục 2.2.4 sẽ giới thiệu công cụ khắc phục giới hạn này.

Thứ hai, các trụ cột không đồng cấp. Dữ liệu lớn, Internet vạn vật công nghiệp, tích hợp hệ thống, điện toán đám mây và an ninh mạng mang tính hạ tầng, tức là điều kiện để các trụ cột khác vận hành. Trong khi đó, sản xuất bồi đắp và thực tại tăng cường là các ứng dụng chuyên biệt có phạm vi tác động hẹp hơn nhiều. Xếp chúng ngang hàng trong một danh sách chín mục dễ dẫn tới sai lệch ưu tiên đầu tư.

Thứ ba, khung này không đề cập tới con người và tổ chức, hai yếu tố mà cả acatech Industrie 4.0 Maturity Index lẫn nghiên cứu thực nghiệm về triển khai đều xác định là biến quyết định thành bại. Đây là khoảng trống mà mục 2.12 của chương sẽ bù đắp.

2.2.2. Nội hàm và cơ chế tạo giá trị của từng trụ cột

Bảng 2.2. Chín trụ cột công nghệ: nội hàm, cơ chế tạo giá trị và điều kiện áp dụng

Trụ cột	Nội hàm	Cơ chế tạo giá trị vận hành	Điều kiện áp dụng tối thiểu
1. Dữ liệu lớn và phân tích	Thu thập, lưu trữ và phân tích khối lượng lớn dữ liệu đa nguồn, tốc độ cao	Phát hiện quy luật ẩn; chuyển từ báo cáo hồi cố sang chẩn đoán và dự báo	Dữ liệu có ngữ cảnh, được gán nhãn và chuẩn hóa; có người đủ năng lực diễn giải kết quả
2. Robot tự hành	Robot công nghiệp, ứng dụng cộng tác, robot di động tự hành	Thay thế thao tác lặp lại, nặng nhọc, nguy hiểm; ổn định chất lượng và nhịp sản xuất	Sản lượng đủ lớn hoặc số ca đủ nhiều; quy trình đã chuẩn hóa; hạ tầng an toàn đầy đủ
3. Mô phỏng và bản sao số	Mô hình số động của sản phẩm, quy trình hoặc hệ thống	Thử nghiệm phương án trong môi trường ảo trước khi can thiệp thực; tối ưu tham số	Mô hình được kiểm định trên dữ liệu độc lập; luồng dữ liệu thực cập nhật liên tục

Trụ cột	Nội hàm	Cơ chế tạo giá trị vận hành	Điều kiện áp dụng tối thiểu
4. Tích hợp hệ thống ngang và dọc	Liên thông dữ liệu giữa các cấp và giữa các mắt xích chuỗi giá trị	Xóa độ trễ và sai lệch giữa các hệ thống; cho phép quyết định dựa trên bức tranh toàn cục	Mô hình dữ liệu và định nghĩa chỉ số thống nhất; quyền sở hữu dữ liệu rõ ràng
5. Internet vạn vật công nghiệp	Hạ tầng kết nối thiết bị và hệ thống trong sản xuất	Cung cấp dữ liệu nguồn thời gian thực cho toàn bộ các trụ cột còn lại	Thiết bị có khả năng truyền thông hoặc có phương án trang bị bổ sung; hạ tầng mạng ổn định
6. An ninh mạng	Bảo vệ hệ thống vận hành và dữ liệu công nghiệp	Bảo toàn tính sẵn sàng của sản xuất; bảo vệ sở hữu trí tuệ và an toàn con người	Kiểm kê tài sản mạng; phân tách vùng; quy trình ứng phó sự cố đã diễn tập
7. Điện toán đám mây	Hạ tầng tính toán và lưu trữ theo nhu cầu	Mở rộng năng lực phân tích không cần đầu tư lớn ban đầu; so sánh nhiều nhà máy	Đường truyền ổn định; chính sách phân loại dữ liệu nhạy cảm đã ban hành
8. Sản xuất bồi đắp	Chế tạo bồi đắp theo lớp từ mô hình số	Rút ngắn chu kỳ tạo mẫu; sản xuất phụ tùng theo yêu cầu; chế tạo hình học phức tạp	Sản lượng thấp hoặc hình học đặc thù; năng lực thiết kế cho sản xuất bồi đắp
9. Thực tại tăng cường và thực tại ảo	Chồng lớp thông tin số lên môi trường thực hoặc tạo môi trường mô phỏng	Giảm lỗi thao tác; rút ngắn thời gian đào tạo; hỗ trợ bảo trì từ xa	Nội dung hướng dẫn được số hóa và cập nhật; thiết bị phù hợp môi trường xưởng

2.2.3. Cấu trúc lõi và vỏ của khung chín trụ cột

Nhìn vào Bảng 2.2 có thể rút ra một nhận xét cấu trúc quan trọng: các trụ cột 1, 4, 5, 6 và 7 tạo thành lõi hạ tầng dữ liệu, còn các trụ cột 2, 3, 8 và 9 là các ứng dụng khai thác lõi đó. Trình tự đầu tư hợp lý vì vậy thường đi từ lõi ra ngoài, phù hợp với phát hiện thực nghiệm về mô thức triển khai theo trình tự đã nêu ở Chương 1.

CẤU TRÚC LỖI VÀ VỎ CỦA KHUNG CHÍNH TRỤ CỘT CÔNG NGHỆ



Hàm ý về trình tự đầu tư: xây lỗi trước, mở ứng dụng sau.
Đầu tư ứng dụng khi lỗi chưa ổn định sẽ tạo thêm một đảo dữ liệu mới thay vì tạo ra năng lực mới.

Hình 2.2. Cấu trúc lỗi và vỏ của khung chính trụ cột công nghệ

Nguồn: Tác giả xây dựng trên cơ sở phân tích cấu trúc khung chính trụ cột, có tham chiếu phát hiện về mô thức triển khai theo trình tự của Frank, Dalenogare và Ayala (2019).

Hàm ý quản trị của cách nhìn này rất cụ thể. Khi một nhà cung cấp chào bán giải pháp thuộc lớp vỏ, chẳng hạn một hệ thống thực tại tăng cường cho bảo trì, câu hỏi thẩm định đầu tiên không phải là giải pháp có tốt không, mà là lỗi dữ liệu đã sẵn sàng cấp nguồn cho giải pháp đó chưa. Nếu chưa, giải pháp sẽ buộc phải mang theo cơ sở dữ liệu riêng, và nhà máy vừa tạo thêm một đảo dữ liệu mới thay vì tạo ra năng lực mới.

2.2.4. Ma trận trụ cột và bốn mục tiêu cạnh tranh vận hành

Công cụ thẩm định hữu ích nhất ở giai đoạn lựa chọn công nghệ là ma trận đối chiếu từng trụ cột với bốn mục tiêu cạnh tranh vận hành đã học ở Chương 1, gồm chi phí, chất lượng, thời gian giao hàng và tính linh hoạt. Bốn mục tiêu này cũng chính là bốn tiêu chí mà Budde và cộng sự (2023) dùng để đánh giá tác động của từng trường hợp sử dụng trong khung nhà máy thông minh của họ.

Ma trận dưới đây thể hiện mức độ tác động điển hình, trong đó ký hiệu C là cao, T là trung bình và Th là thấp. Cần nhấn mạnh rằng đây là giá trị tham chiếu để tranh luận chứ không phải chân lý; nhiệm vụ của sinh viên trong bài tập trên lớp là bảo vệ hoặc bác bỏ từng ô bằng lập luận gắn với một bối cảnh nhà máy cụ thể.

Bảng 2.3. Ma trận chính trụ cột công nghệ và bốn mục tiêu cạnh tranh vận hành

Trụ cột	Chi phí	Chất lượng	Thời gian giao hàng	Tính linh hoạt
Dữ liệu lớn và phân tích	C	C	T	T
Robot tự hành	C	C	T	Th đến T
Mô phỏng và bản sao số	T	C	T	C
Tích hợp ngang và dọc	T	T	C	C
Internet vạn vật công nghiệp	C	T	C	T
An ninh mạng	Th, tác động gián tiếp	Th	C, bảo toàn tính sẵn sàng	Th
Điện toán đám mây	T	Th	T	C
Sản xuất bồi đắp	Th, trừ trường hợp phụ tùng	T	C với tạo mẫu và phụ tùng	C
Thực tại tăng cường và thực tại ảo	T	C	T	T

ĐIỂM CẦN NHỚ

Khi đọc Bảng 2.3, cần tránh hai sai lầm.

Sai lầm thứ nhất là cộng dồn các chữ C để kết luận công nghệ nào tốt nhất. Điều đó vô nghĩa vì trọng số của bốn mục tiêu khác nhau ở mỗi doanh nghiệp tùy theo chiến lược cạnh tranh. Một doanh nghiệp cạnh tranh bằng thời gian giao hàng phải đọc cột thứ ba trước tiên, còn một doanh nghiệp gia công cạnh tranh bằng chi phí lại đọc cột thứ nhất.

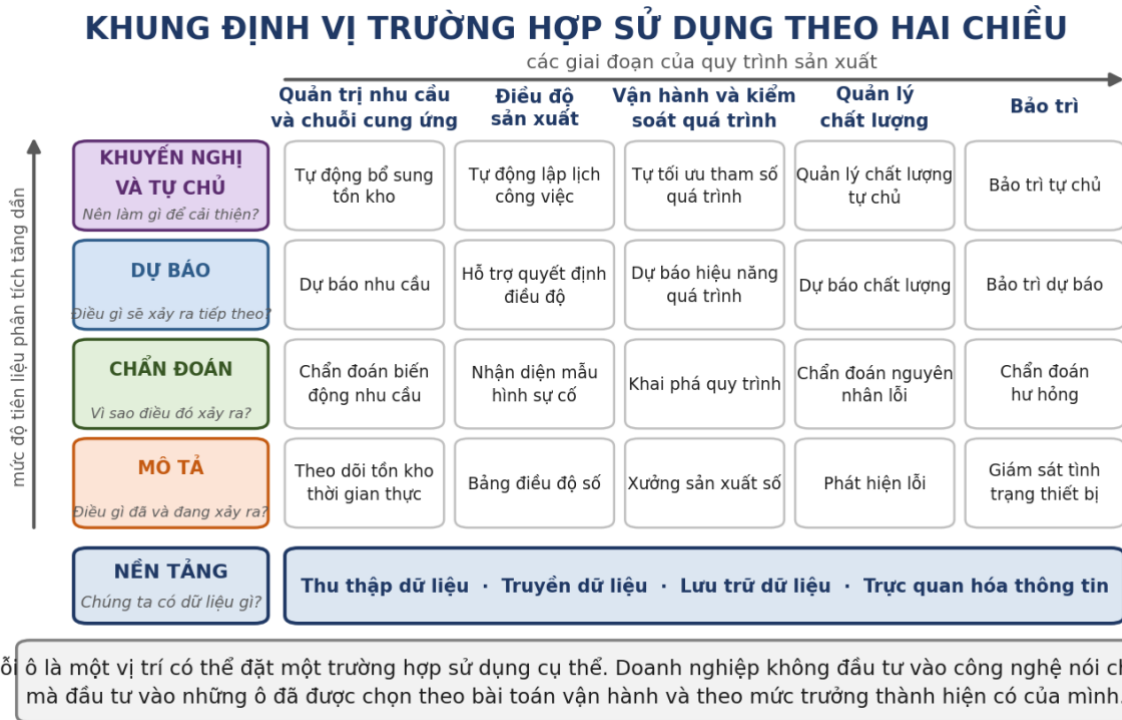
Sai lầm thứ hai là bỏ qua các ô có tác động gián tiếp. An ninh mạng gần như không cải thiện chỉ số nào trong điều kiện bình thường, nhưng bảo vệ toàn bộ giá trị mà các trụ cột khác tạo ra. Đầu tư an ninh mạng vì vậy phải được thẩm định theo logic *tổn thất kỳ vọng tránh được*, đúng như bước bốn của khung thẩm định ở Hình 2.1.

2.2.5. Từ trụ cột công nghệ tới trường hợp sử dụng

Giới hạn thứ nhất của khung chín trụ cột, tức việc phân loại theo công nghệ chứ không theo bài toán quản trị, được khắc phục bằng một công cụ khác: khung định vị trường hợp sử dụng. Cách tiếp cận này được Budde, Hänggi, Friedli và Rüedy (2023) hệ thống hóa trong nghiên cứu về nhà máy thông minh, trong đó các tác giả nhận diện 44 trường hợp sử dụng phổ quát và ánh xạ chúng

với 25 công nghệ số. Điểm cốt lõi trong lập luận của nhóm tác giả này là công nghệ chỉ đóng vai trò phương tiện, còn đơn vị lựa chọn và đầu tư thực sự phải là trường hợp sử dụng.

Một trường hợp sử dụng được định vị đồng thời trên hai chiều. Chiều thứ nhất là giai đoạn của quy trình sản xuất, trải từ quản trị nhu cầu, quản trị chuỗi cung ứng và mua hàng, điều độ sản xuất, tối ưu hóa và kiểm soát quá trình, quản lý chất lượng, cho tới bảo trì. Chiều thứ hai là mức độ tiên liệu phân tích, tức mức độ mà hệ thống có thể nhìn về phía trước và tự hành động.



Hình 2.3. Khung định vị trường hợp sử dụng theo giai đoạn quy trình và mức độ tiên liệu phân tích

Nguồn: Tác giả biên vẽ theo khung nhà máy thông minh của Budde, Hänggi, Friedli và Rüedy (2023), có bổ sung ví dụ minh họa cho từng ô.

Bảng 2.4. Năm mức độ tiên liệu phân tích và ý nghĩa quản trị

Mức độ	Câu hỏi trả lời được	Đặc trưng kỹ thuật	Vai trò của con người
Nền tảng	Chúng ta có dữ liệu gì	Thu thập, truyền, lưu trữ và trực quan hóa dữ liệu	Con người quyết định đo cái gì và trình bày cho ai
Mô tả	Điều gì đã và đang xảy ra	Tổng hợp, đối chiếu và hiển thị trạng thái quá khứ cùng hiện tại	Con người diễn giải toàn bộ và tự rút ra kết luận
Chẩn đoán	Vì sao điều đó xảy ra	Phân tích nguyên nhân gốc, tìm quan hệ thống kê giữa các biến	Con người xác nhận giả thuyết nguyên nhân và chọn hành động

Mức độ	Câu hỏi trả lời được	Đặc trưng kỹ thuật	Vai trò của con người
Dự báo	Điều gì sẽ xảy ra tiếp theo	Mô hình dự báo cho ra nhiều kết cục kèm xác suất tương ứng	Con người cân nhắc kịch bản và quyết định can thiệp trước
Khuyến nghị và tự chủ	Nên làm gì để cải thiện	Tối ưu hóa và mô phỏng đề xuất phương án, có thể tự thực thi	Con người giám sát, xác lập ràng buộc và xử lý ngoại lệ

Bảng 2.4 hàm chứa một nguyên tắc quan trọng về trình tự phát triển năng lực. Không thể xây dựng năng lực dự báo khi chưa có năng lực chẩn đoán, vì mô hình dự báo cần biết những biến nào thực sự gây ra kết cục. Tương tự, không thể có năng lực chẩn đoán khi chưa có dữ liệu mô tả đủ tin cậy. Đây là lý do một đề xuất nhảy thẳng từ trạng thái ghi chép thủ công lên bảo trì dự báo gần như chắc chắn thất bại, bất kể chất lượng của thuật toán.

ĐIỂM CẦN NHỚ

Hai công cụ ở mục 2.2 bổ sung cho nhau chứ không thay thế nhau. **Khung chín trụ cột** trả lời câu hỏi *chúng ta có thể dùng phương tiện gì*. **Khung định vị trường hợp sử dụng** trả lời câu hỏi *chúng ta cần giải bài toán nào và đang ở mức năng lực nào*. Quyết định đầu tư đúng đắn luôn bắt đầu từ công cụ thứ hai rồi mới quay lại công cụ thứ nhất, chứ không theo chiều ngược lại.



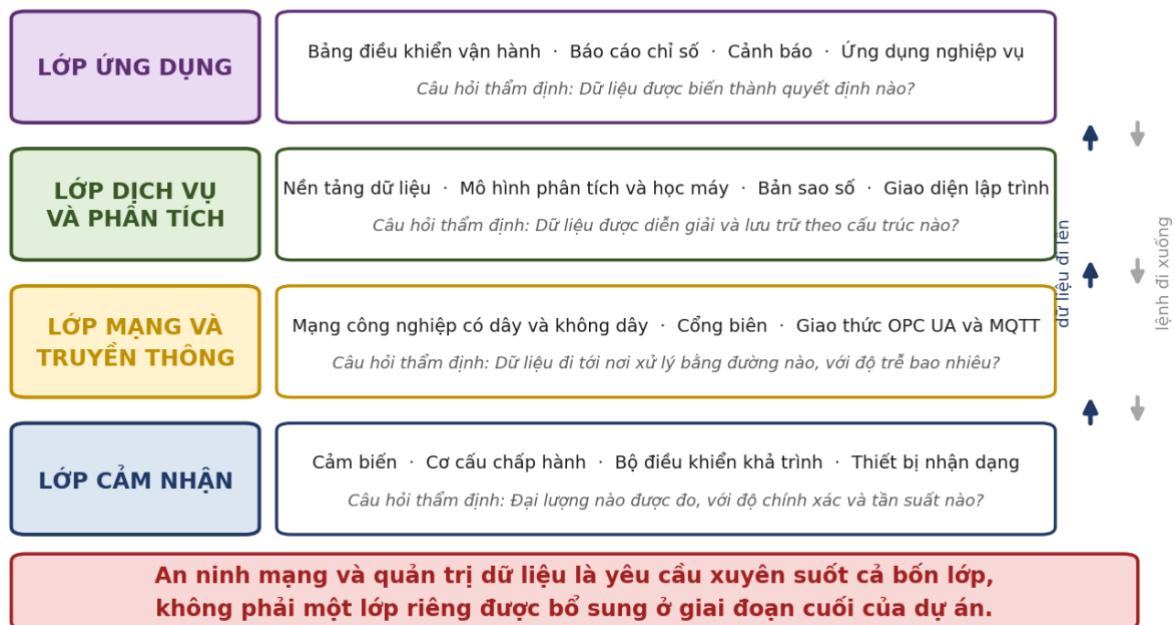
2.3. Kiến trúc dữ liệu của nhà máy kết nối

Mục 2.2 đã chỉ ra rằng năm trong chín trụ cột tạo thành lõi hạ tầng dữ liệu. Mục này đi sâu vào cấu trúc của lõi đó, bởi đây là phần mà nhà quản trị thường ủy thác hoàn toàn cho bộ phận kỹ thuật và cũng là phần mà những quyết định sai lầm gây hậu quả lâu dài nhất. Một quyết định kiến trúc sai có thể khóa doanh nghiệp vào một nhà cung cấp duy nhất trong mười năm, trong khi một quyết định mua sắm sai chỉ gây thiệt hại một lần.

2.3.1. Bốn lớp của kiến trúc IoT công nghiệp

Hệ thống IoT trong nhà máy được mô tả phổ biến theo bốn lớp chức năng. Deshpande và cộng sự (2024) trình bày cấu trúc này gồm lớp cảm nhận với các thiết bị vật lý, lớp mạng bảo đảm truyền thông, lớp dịch vụ quản lý quy trình và logic nghiệp vụ, cùng lớp ứng dụng phục vụ trực quan hóa và phân tích.

KIẾN TRÚC BỐN LỚP CỦA HỆ THỐNG IoT CÔNG NGHIỆP TRONG NHÀ MÁY



Hình 2.4. Kiến trúc bốn lớp của hệ thống IoT công nghiệp trong nhà máy

Nguồn: Tác giả biên vẽ theo mô tả kiến trúc IoT của Deshpande, Sarkar, Dave và Dave (2024), có bổ sung câu hỏi thăm định cho từng lớp.

Lớp cảm nhận gồm cảm biến, cơ cấu chấp hành, bộ điều khiển khả trình và các thiết bị nhận dạng cùng truy vết. Câu hỏi thăm định ở lớp này là đại lượng nào được đo, với độ chính xác và tần suất nào. Một sai lầm thường gặp là đo những đại lượng dễ đo thay vì những đại lượng thực sự giải thích hành vi của quá trình.

Lớp mạng và truyền thông đưa dữ liệu từ thiết bị tới nơi xử lý. Câu hỏi thăm định là dữ liệu đi bằng đường nào và với độ trễ bao nhiêu. Điểm quản trị quan trọng nhất ở lớp này là khả năng liên

thông: nếu mỗi thiết bị nói một ngôn ngữ riêng và không có công biên chuyển đổi, chi phí tích hợp sẽ tăng theo cấp số nhân khi số thiết bị tăng.

Lớp dịch vụ và phân tích bao gồm nền tảng dữ liệu, mô hình phân tích và học máy, bản sao số cùng các giao diện lập trình. Câu hỏi thăm định là dữ liệu được diễn giải và lưu trữ theo cấu trúc nào. Đây là lớp quyết định liệu dữ liệu có thể dùng lại cho mục đích khác trong tương lai hay chỉ phục vụ đúng một ứng dụng ban đầu.

Lớp ứng dụng là nơi dữ liệu gặp người dùng, thông qua bảng điều khiển vận hành, báo cáo chỉ số, cảnh báo và các ứng dụng nghiệp vụ. Câu hỏi thăm định ở lớp này gay gắt nhất: dữ liệu được biến thành quyết định nào. Nếu câu trả lời là không có quyết định nào thay đổi, thì toàn bộ ba lớp phía dưới đang tạo ra chi phí mà không tạo ra giá trị.

Cần nhấn mạnh rằng an ninh mạng và quản trị dữ liệu là yêu cầu xuyên suốt cả bốn lớp, không phải một lớp riêng được bổ sung ở giai đoạn cuối của dự án. Mục 2.11 sẽ trở lại nguyên tắc này một cách chi tiết.

2.3.2. Điện toán biên và điện toán đám mây: tiêu chí phân bổ tải xử lý

Một quyết định kiến trúc lặp lại trong mọi dự án là xử lý dữ liệu ở đâu. Điện toán biên đặt năng lực tính toán ngay gần nguồn phát sinh dữ liệu, còn điện toán đám mây tập trung dữ liệu về hạ tầng dùng chung. Deshpande và cộng sự (2024) nhấn mạnh rằng việc gửi toàn bộ dữ liệu IoT về đám mây tập trung trước khi xử lý sẽ tạo ra độ trễ gây tổn hại cho những ứng dụng cần phản hồi thời gian thực, và điện toán biên chính là giải pháp cho vấn đề này.

Bảng 2.5. Tiêu chí lựa chọn giữa xử lý tại biên và xử lý trên đám mây

Tiêu chí	Ưu tiên xử lý tại biên khi	Ưu tiên xử lý trên đám mây khi
Yêu cầu độ trễ	Vòng phản hồi tính bằng mili giây tới giây, chẳng hạn khóa liên động an toàn hoặc điều chỉnh tham số máy	Vòng phản hồi tính bằng phút, giờ hoặc ngày, chẳng hạn báo cáo ca hoặc phân tích xu hướng
Khối lượng dữ liệu	Dữ liệu tần suất cao như rung động và dòng điện, truyền toàn bộ về trung tâm là không kinh tế	Dữ liệu đã tổng hợp, khối lượng vừa phải nhưng cần lưu trữ dài hạn
Độ ổn định đường truyền	Kết nối tới trung tâm không bảo đảm liên tục, sản xuất không được phép dừng khi mất mạng	Đường truyền ổn định, gián đoạn ngắn không ảnh hưởng tới quyết định
Tính nhạy cảm của dữ liệu	Dữ liệu chứa bí quyết công nghệ hoặc dữ liệu cá nhân cần hạn chế phạm vi lưu trữ	Dữ liệu đã ẩn danh hoặc không thuộc nhóm nhạy cảm theo chính sách phân loại

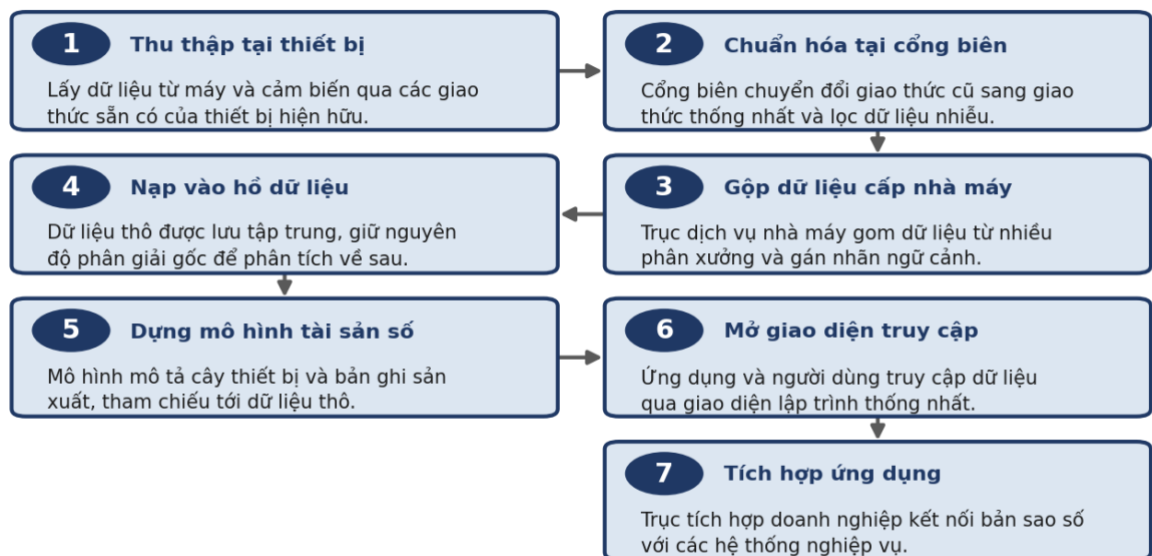
Tiêu chí	Ưu tiên xử lý tại biên khi	Ưu tiên xử lý trên đám mây khi
Nhu cầu so sánh nhiều nhà máy	Không có nhu cầu, phân tích chỉ phục vụ một dây chuyền	Có nhu cầu đối sánh giữa nhiều nhà máy hoặc nhiều thời kỳ
Cấu trúc chi phí	Đầu tư một lần vào thiết bị biên, chi phí vận hành thấp và dự đoán được	Chi phí theo mức sử dụng, linh hoạt nhưng tăng nhanh khi khối lượng dữ liệu tăng

Trong thực tiễn, lựa chọn không phải là loại trừ mà là phân bổ. Mô thức phổ biến hiện nay là xử lý tại biên các tác vụ cần phản hồi nhanh và lọc bớt dữ liệu nhiễu, sau đó chỉ chuyển phần dữ liệu có giá trị phân tích lâu dài về trung tâm. Cách phân bổ này vừa bảo đảm thời gian thực vừa kiểm soát được chi phí truyền và lưu trữ.

2.3.3. Quy trình bảy bước đưa dữ liệu từ hiện trường tới bản sao số

Phần lớn tranh cãi giữa bộ phận sản xuất và bộ phận công nghệ thông tin bắt nguồn từ việc hai bên không cùng nhìn thấy toàn bộ hành trình của một điểm dữ liệu. Quy trình bảy bước dưới đây làm rõ hành trình đó, được xây dựng theo mô tả của Deshpande và cộng sự (2024) về đường đi của dữ liệu từ sản xuất tới mô hình bản sao số và tới các ứng dụng nghiệp vụ.

QUY TRÌNH BẢY BƯỚC ĐƯA DỮ LIỆU TỪ HIỆN TRƯỜNG TỚI BẢN SAO SỐ



Nguyên tắc kiểm tra: nếu bước 2 và bước 3 bị bỏ qua thì bản sao số nhận được dữ liệu không có ngữ cảnh, và mọi kết quả phân tích ở bước 5 đều mất giá trị dù thuật toán chính xác đến đâu.

Hình 2.5. Quy trình bảy bước đưa dữ liệu từ hiện trường tới bản sao số

Nguồn: Tác giả biên vẽ theo quy trình dữ liệu cho bản sao số của Deshpande, Sarkar, Dave và Dave (2024).

Bước một, thu thập tại thiết bị. Dữ liệu được lấy từ máy móc và cảm biến thông qua các giao thức sẵn có của thiết bị hiện hữu. Trong nhà máy Việt Nam điển hình, đây là nơi bộc lộ vấn đề

thiết bị đa thế hệ: máy mới có sẵn giao diện dữ liệu, còn máy cũ cần bổ sung cảm biến ngoài hoặc bộ đọc tín hiệu.

Bước hai, chuẩn hóa tại cổng biên. Cổng biên chuyển đổi giao thức riêng của từng nhà sản xuất sang một giao thức thống nhất, đồng thời lọc bỏ dữ liệu nhiễu và dữ liệu trùng lặp. Bỏ qua bước này đồng nghĩa với việc mọi hệ thống phía sau đều phải tự xử lý sự khác biệt về giao thức, và chi phí tích hợp sẽ nhân lên theo số cặp kết nối.

Bước ba, gộp dữ liệu cấp nhà máy. Trục dịch vụ nhà máy gom dữ liệu từ nhiều phân xưởng và gán nhãn ngữ cảnh cho từng điểm dữ liệu, tức là ghi kèm thông tin về máy nào, ca nào, đơn hàng nào, người vận hành nào. Đây là bước tạo ra khác biệt giữa dữ liệu có thể phân tích và dữ liệu chỉ là một chuỗi số vô nghĩa.

Bước bốn, nạp vào hồ dữ liệu. Dữ liệu thô được lưu tập trung, giữ nguyên độ phân giải gốc. Nguyên tắc ở đây là không hủy dữ liệu gốc, vì những câu hỏi phân tích của năm sau thường cần mức chi tiết mà câu hỏi của năm nay không cần tới.

Bước năm, dựng mô hình tài sản số. Một mô hình thống nhất mô tả cây thiết bị, cấu trúc sản phẩm và bản ghi sản xuất, trong đó mỗi phần tử tham chiếu tới dữ liệu thô tương ứng trong hồ dữ liệu. Đây chính là nền của bản sao số sẽ được bàn ở mục 2.5.

Bước sáu, mở giao diện truy cập. Ứng dụng và người dùng truy cập dữ liệu qua giao diện lập trình thống nhất thay vì kết nối trực tiếp vào cơ sở dữ liệu. Cách làm này cho phép thay đổi hạ tầng lưu trữ phía sau mà không phá vỡ các ứng dụng đang chạy.

Bước bảy, tích hợp ứng dụng. Trục tích hợp doanh nghiệp kết nối mô hình tài sản số với các hệ thống nghiệp vụ như hoạch định nguồn lực, điều hành sản xuất và quản lý bảo trì, xử lý việc định tuyến và chuyển đổi định dạng giữa chúng.

ĐIỂM CẦN NHỚ

Bước hai và bước ba của Hình 2.5 là hai bước bị cắt bỏ nhiều nhất khi dự án bị ép tiến độ, vì chúng không tạo ra kết quả nhìn thấy được ngay. Hậu quả xuất hiện muộn nhưng nghiêm trọng: bản sao số nhận được dữ liệu không có ngữ cảnh, và mọi kết quả phân tích ở bước năm đều mất giá trị dù thuật toán chính xác đến đâu. Khi thẩm định một đề xuất, hãy hỏi thẳng nhà cung cấp rằng ngữ cảnh của mỗi điểm dữ liệu được gán ở bước nào và ai chịu trách nhiệm về tính đúng đắn của nhãn đó.

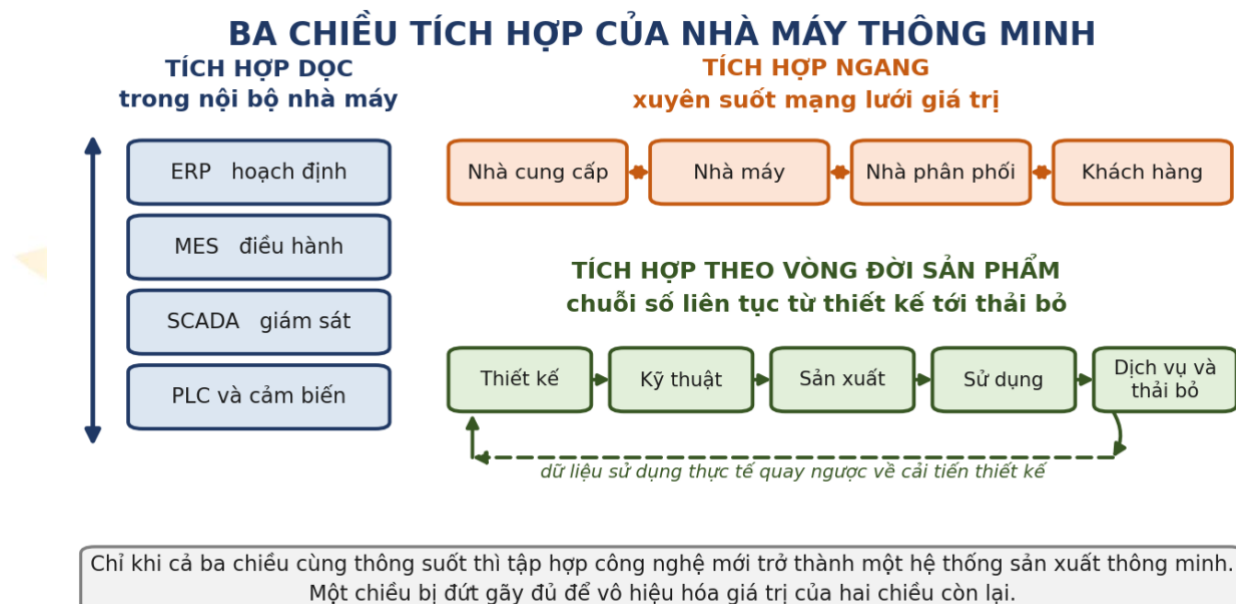
2.4. Logic tích hợp: điều kiện để các trụ cột trở thành một hệ thống

2.4.1. Ba chiều tích hợp

Một tập hợp công nghệ chỉ trở thành hệ thống sản xuất thông minh khi được tích hợp theo ba chiều bổ sung cho nhau.

Bảng 2.6. Ba chiều tích hợp trong nhà máy thông minh

Chiều tích hợp	Phạm vi	Câu hỏi trả lời được sau khi tích hợp	Rào cản đặc thù
Theo chiều dọc	Từ cảm biến hiện trường, qua điều khiển, giám sát, điều hành sản xuất, lên tới hoạch định doanh nghiệp trong nội bộ	Kế hoạch của tuần này đang được thực hiện tới đâu ngay lúc này, và trở ngại nằm ở máy nào	Thiết bị đa thế hệ; giao thức đóng; định nghĩa chỉ số khác nhau giữa các phòng ban
Theo chiều ngang	Xuyên suốt nhà cung cấp, nhà máy, nhà phân phối và khách hàng trong mạng lưới giá trị	Nếu nhà cung cấp giao trễ ba ngày thì đơn hàng nào của khách hàng nào bị ảnh hưởng	Thiếu tin cậy và thiếu chuẩn chia sẻ dữ liệu giữa các pháp nhân; vấn đề bảo mật thương mại
Theo vòng đời sản phẩm	Từ thiết kế, kỹ thuật, sản xuất, sử dụng đến dịch vụ hậu mãi và thải bỏ	Lỗi phát sinh ở khách hàng bắt nguồn từ quyết định thiết kế hay từ thông số sản xuất nào	Dữ liệu thiết kế và dữ liệu sản xuất nằm ở hai thế giới công cụ khác nhau; thiếu chuỗi số liên tục



Hình 2.6. Ba chiều tích hợp: theo chiều dọc, theo chiều ngang và theo vòng đời sản phẩm

Nguồn: Tác giả xây dựng, có tham chiếu khung tích hợp của Kagermann, Wahlster và Helbig (2013) cùng Wang, Wan, Li và Zhang (2016).

Chiều thứ ba, tức tích hợp theo vòng đời còn gọi là kỹ thuật xuyên suốt hoặc chuỗi số, thường bị bỏ sót trong các chương trình đào tạo nhưng lại là chiều tạo ra lợi thế cạnh tranh bền vững nhất, vì nó cho phép doanh nghiệp học hỏi từ dữ liệu sử dụng thực tế của sản phẩm để cải tiến thiết kế và quy trình. Trường hợp nhà sản xuất ô tô thu thập dữ liệu vận hành của xe đang lưu thông rồi đưa ngược về đội ngũ phát triển sản phẩm để hiệu chỉnh thiết kế cho đời xe kế tiếp là một minh họa điển hình của chiều tích hợp này.

2.4.2. Sáu dạng thất bại tích hợp và dấu hiệu nhận biết sớm

Quan sát thực tiễn cho thấy tỷ lệ thất bại của dự án chuyển đổi số trong sản xuất tập trung ở khâu tích hợp. Nguyên nhân có thể phân thành sáu dạng, mỗi dạng có dấu hiệu nhận biết sớm riêng và biện pháp phòng ngừa tương ứng.

Bảng 2.7. Sáu dạng thất bại tích hợp điển hình

Dạng thất bại	Biểu hiện	Dấu hiệu nhận biết sớm	Biện pháp phòng ngừa
Thất bại ngữ nghĩa	Các hệ thống trao đổi được dữ liệu nhưng hiểu khác nhau về cùng một đại lượng	Hai báo cáo cho hai con số sản lượng khác nhau trong cùng một ngày	Xây từ điển dữ liệu và định nghĩa chỉ số thống nhất trước khi tích hợp
Thất bại kiến trúc	Tích hợp theo cặp điểm tới điểm giữa từng hệ thống, số giao diện tăng rất nhanh	Mỗi khi thêm một hệ thống lại phải sửa nhiều hệ thống cũ	Kiến trúc trung tâm dữ liệu chung theo không gian tên thống nhất
Thất bại chất lượng dữ liệu	Dữ liệu nguồn sai hoặc thiếu, làm sai lệch mọi phân tích phía sau	Người dùng không tin bảng điều khiển và vẫn ghi sổ tay song song	Kiểm toán chất lượng dữ liệu trước, chuẩn hóa quy trình nhập liệu
Thất bại quyền sở hữu	Không rõ ai chịu trách nhiệm về tính đúng đắn của từng trường dữ liệu	Khi số liệu sai, các phòng ban đổ trách nhiệm cho nhau	Gán chủ sở hữu dữ liệu cho từng nhóm trường và đưa vào mô tả công việc
Thất bại quy trình	Hệ thống được cài đặt nhưng quy trình làm việc không thay đổi tương ứng	Người vận hành nhập liệu cuối ca cho đủ thủ tục thay vì nhập tại thời điểm phát sinh	Thiết kế lại quy trình đồng thời với thiết kế hệ thống, không tách rời
Thất bại nhân rộng	Thí điểm thành công nhưng không nhân rộng được sang chuyên khác	Mỗi lần triển khai mới lại phải làm lại gần như từ đầu	Chuẩn hóa mẫu triển khai và tài liệu cấu hình ngay từ giai đoạn thí điểm

Trong sáu dạng trên, thất bại ngữ nghĩa là dạng khó khắc phục nhất sau khi đã xảy ra, vì nó không lộ ra ở tầng kỹ thuật. Hai hệ thống vẫn kết nối tốt, dữ liệu vẫn chảy, nhưng ý nghĩa của con

số lại khác nhau. Việc sửa chữa đòi hỏi rà soát lại toàn bộ định nghĩa chỉ số, thuyết phục nhiều phòng ban từ bỏ cách tính quen thuộc của mình, và thường phải xử lý lại dữ liệu lịch sử. Đây là lý do nguyên tắc quan trọng nhất của mục này là quyết định về kiến trúc dữ liệu và từ điển dữ liệu phải đi trước quyết định chọn nhà cung cấp.

2.4.3. Quy trình sáu bước thẩm định một đề xuất công nghệ

Khung thẩm định bốn bước ở Hình 2.1 là công cụ tư duy. Quy trình dưới đây là công cụ thủ tục, dùng để chuẩn hóa cách một hội đồng đầu tư xử lý một đề xuất cụ thể. Điểm khác biệt cốt lõi so với quy trình mua sắm thông thường là mỗi bước đều có tiêu chí loại bỏ, cho phép dừng sớm thay vì đi hết quy trình rồi mới phát hiện vấn đề.

QUY TRÌNH SÁU BƯỚC THẨM ĐỊNH MỘT ĐỀ XUẤT CÔNG NGHỆ



Hình 2.7. Quy trình sáu bước thẩm định một đề xuất công nghệ

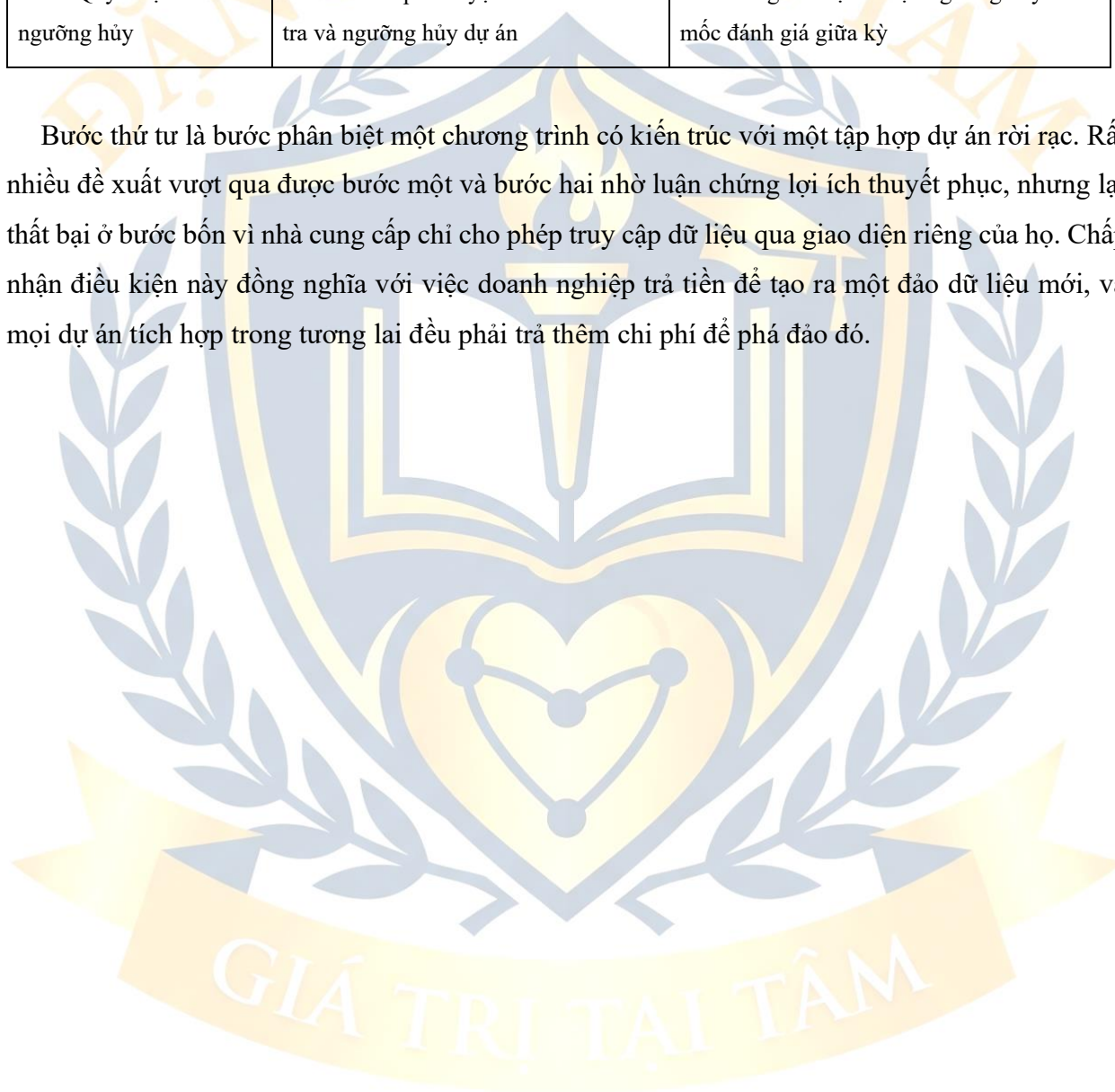
Nguồn: Tác giả xây dựng.

Bảng 2.8. Sản phẩm đầu ra và tiêu chí loại bỏ của từng bước thẩm định

Bước	Sản phẩm đầu ra	Tiêu chí để đề xuất bị loại ngay tại bước này
1. Xác định bài toán vận hành	Tên chỉ số và mức chênh so với chuẩn đối sánh	Không chỉ ra được chỉ số nào sẽ thay đổi và thay đổi bao nhiêu
2. Kiểm tra điều kiện áp dụng	Bảng đối chiếu với cột điều kiện tối thiểu ở Bảng 2.2	Thiếu ít nhất một điều kiện tối thiểu mà không có phương án bù đắp
3. Định vị trên ba chiều tích hợp	Sơ đồ phạm vi tác động trên ba chiều	Giải pháp tạo thêm một đảo dữ liệu mới thay vì nối vào chuỗi hiện có

Bước	Sản phẩm đầu ra	Tiêu chí để đề xuất bị loại ngay tại bước này
4. Kiểm tra kiến trúc và ngữ nghĩa	Cam kết tuân thủ từ điển dữ liệu chung và quyền truy cập dữ liệu thô	Nhà cung cấp không cho phép truy cập dữ liệu thô của chính thiết bị doanh nghiệp sở hữu
5. Lượng hóa lợi ích và chi phí	Giá trị hiện tại ròng, thời gian hoàn vốn, chi phí an ninh và chi phí đào tạo	Lợi ích không quy đổi được thành dòng tiền hoặc thành tổn thất tránh được
6. Quyết định kèm ngưỡng hủy	Văn bản phê duyệt kèm mốc kiểm tra và ngưỡng hủy dự án	Không xác định được ngưỡng hủy và mốc đánh giá giữa kỳ

Bước thứ tư là bước phân biệt một chương trình có kiến trúc với một tập hợp dự án rời rạc. Rất nhiều đề xuất vượt qua được bước một và bước hai nhờ luận chứng lợi ích thuyết phục, nhưng lại thất bại ở bước bốn vì nhà cung cấp chỉ cho phép truy cập dữ liệu qua giao diện riêng của họ. Chấp nhận điều kiện này đồng nghĩa với việc doanh nghiệp trả tiền để tạo ra một đảo dữ liệu mới, và mọi dự án tích hợp trong tương lai đều phải trả thêm chi phí để phá đảo đó.



2.5. Bản sao số

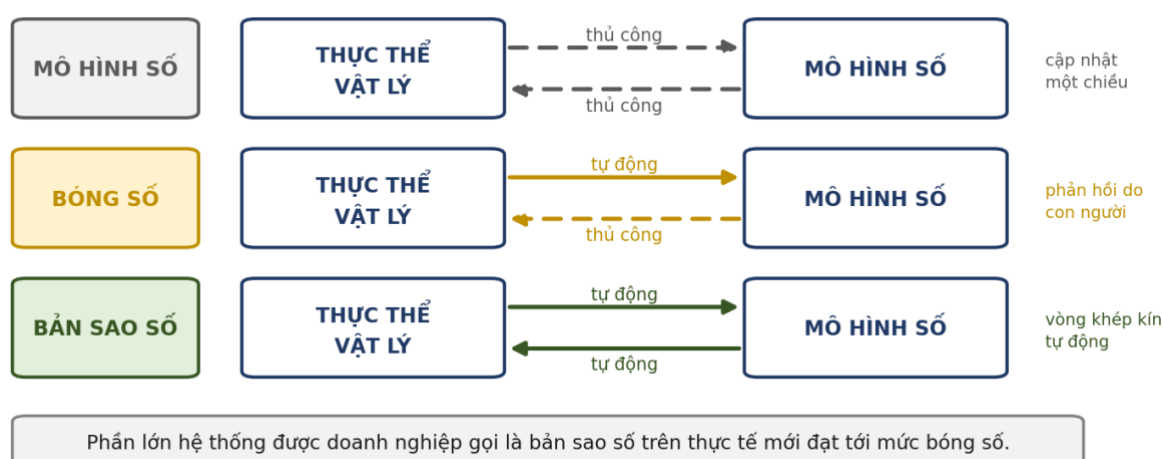
2.5.1. Phân biệt mô hình số, bóng số và bản sao số

Thuật ngữ bản sao số bị sử dụng rộng rãi tới mức mất đi nội hàm. Trong tài liệu học thuật, tiêu chí phân định dựa trên hướng và mức độ tự động của luồng dữ liệu giữa thực thể vật lý và mô hình số. Cách phân loại được chấp nhận rộng rãi nhất thuộc về Kritzingner, Karner, Traar, Henjes và Sihm (2018).

Bảng 2.9. Ba mức độ số hóa mô hình và tiêu chí phân định

Mức độ	Luồng dữ liệu từ vật lý sang số	Luồng dữ liệu từ số sang vật lý	Ví dụ điển hình trong nhà máy
Mô hình số	Thủ công	Thủ công	Bản vẽ ba chiều của cụm chi tiết; mô hình mô phỏng dây chuyền dùng dữ liệu nhập tay từ khảo sát thời gian
Bóng số	Tự động, thời gian thực	Thủ công	Bảng điều khiển hiển thị trạng thái và hiệu suất máy theo thời gian thực; con người quan sát rồi quyết định can thiệp
Bản sao số	Tự động, thời gian thực	Tự động	Mô hình tự tính lại thông số tối ưu theo điều kiện hiện tại và gửi lệnh điều chỉnh trở lại thiết bị trong miền được ủy quyền

PHÂN BIỆT MÔ HÌNH SỐ, BÓNG SỐ VÀ BẢN SAO SỐ THEO LUỒNG DỮ LIỆU



Hình 2.8. Phân biệt mô hình số, bóng số và bản sao số theo luồng dữ liệu

Nguồn: Tác giả biên vẽ theo khung phân loại của Kritzingner, Karner, Traar, Henjes và Sihm (2018).

Phần lớn những gì doanh nghiệp gọi là bản sao số trên thực tế mới ở mức bóng số. Điều này tự nó không phải là vấn đề, bởi bóng số đã tạo ra giá trị quản trị rất lớn và là bước đi hợp lý trong lộ trình phát triển năng lực. Vấn đề chỉ phát sinh trong hai tình huống: khi doanh nghiệp trả giá của

bản sao số nhưng nhận được năng lực của bóng số, và khi kỳ vọng của lãnh đạo được đặt sai mức khiến dự án bị đánh giá là thất bại dù nó vận hành đúng thiết kế.

2.5.2. Ba cấp đối tượng của bản sao số

Bảng 2.10. Ba cấp đối tượng của bản sao số trong sản xuất

Cấp	Đối tượng	Ứng dụng chính	Độ khó và chi phí
Sản phẩm	Một chi tiết, cụm chi tiết hoặc sản phẩm hoàn chỉnh	Thiết kế và thử nghiệm ảo; truy vết lịch sử chế tạo; dịch vụ hậu mãi dựa trên dữ liệu sử dụng thực tế	Thấp đến trung bình
Quy trình	Một công đoạn, một máy hoặc một dây chuyền	Tối ưu tham số công nghệ; bảo trì dự báo; huấn luyện người vận hành trong môi trường mô phỏng	Trung bình
Hệ thống	Toàn bộ nhà máy hoặc mạng lưới sản xuất	Mô phỏng kịch bản công suất; đánh giá phương án bố trí mặt bằng; kiểm thử ứng suất chuỗi cung ứng	Cao

Trình tự phát triển hợp lý đi từ cấp quy trình chứ không từ cấp hệ thống. Lý do là bản sao số cấp quy trình có phạm vi dữ liệu đủ hẹp để kiểm định được độ chính xác, đủ gần với một quyết định vận hành cụ thể để chứng minh giá trị, và đủ nhỏ để nếu thất bại thì tổn thất còn kiểm soát được.

2.5.3. Năm điều kiện dữ liệu để bản sao số có giá trị

Một bản sao số chỉ tạo giá trị khi thỏa mãn đồng thời năm điều kiện dưới đây. Thiếu bất kỳ điều kiện nào, mô hình vẫn chạy được nhưng kết quả không dùng được cho quyết định.

Thứ nhất là độ phủ dữ liệu. Các biến ảnh hưởng lớn tới hành vi của đối tượng đều phải được đo, không chỉ các biến dễ đo. Một mô hình dự báo hư hỏng máy nén khí dựa trên nhiệt độ và dòng điện nhưng bỏ qua rung động sẽ bỏ sót đúng cơ chế hỏng phổ biến nhất.

Thứ hai là tần suất phù hợp. Chu kỳ lấy mẫu phải ngắn hơn đáng kể so với chu kỳ biến động của hiện tượng cần nắm bắt. Đo mỗi giờ một lần một quá trình biến động theo phút thì dữ liệu thu được chỉ phản ánh nhiễu chứ không phản ánh xu hướng.

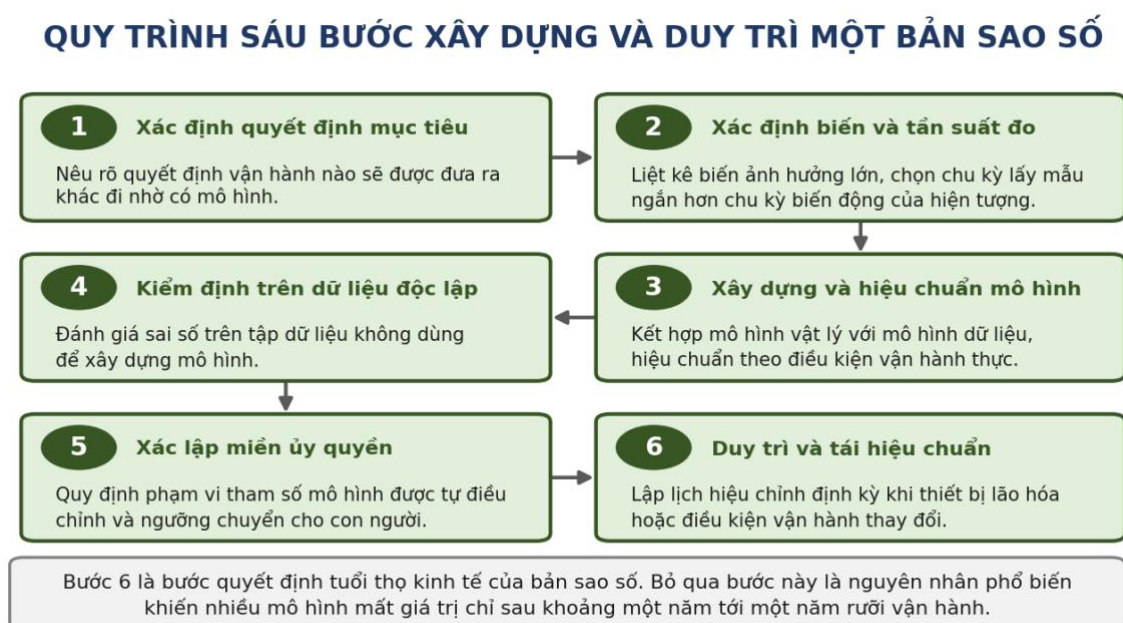
Thứ ba là độ tin cậy của mô hình. Mô hình phải được kiểm định trên tập dữ liệu độc lập với dữ liệu dùng để xây dựng. Đây là ranh giới giữa một mô hình thực sự khái quát hóa được và một mô hình chỉ ghi nhớ dữ liệu quá khứ.

Thứ tư là cơ chế cập nhật. Mô hình phải được hiệu chỉnh định kỳ khi thiết bị lão hóa hoặc điều kiện vận hành thay đổi. Việc bỏ qua điều kiện này là nguyên nhân khiến nhiều bản sao số mất giá

trị chỉ sau khoảng một năm đến một năm rưỡi vận hành, trong khi ngân sách dự án lại được lập cho vòng đời năm năm.

Thứ năm là miền ủy quyền rõ ràng. Phải quy định trước phạm vi tham số mà mô hình được phép tự điều chỉnh và ngưỡng bắt buộc chuyển quyết định cho con người. Điều kiện này vừa là yêu cầu an toàn vừa là yêu cầu trách nhiệm giải trình.

2.5.4. Quy trình sáu bước xây dựng và duy trì một bản sao số



Hình 2.9. Quy trình sáu bước xây dựng và duy trì một bản sao số

Nguồn: Tác giả xây dựng trên cơ sở năm điều kiện dữ liệu nêu ở mục 2.5.3, có tham chiếu Tao, Qi, Wang và Nee (2019).

Điểm đáng chú ý về mặt quản trị là bước một không phải là bước kỹ thuật. Câu hỏi mở đầu của quy trình không phải là chúng ta mô phỏng cái gì, mà là quyết định vận hành nào sẽ được đưa ra khác đi nhờ có mô hình này. Nếu người vận hành vẫn làm đúng như trước khi có mô hình, thì mô hình dù chính xác đến đâu cũng có giá trị vận hành bằng không.

Ở chiều ngược lại, bước sáu quyết định tuổi thọ kinh tế của khoản đầu tư. Chi phí duy trì và tái hiệu chuẩn phải được đưa vào luận chứng kinh tế ngay từ đầu, cùng với việc chỉ định rõ bộ phận nào chịu trách nhiệm thực hiện và với tần suất nào.

2.5.5. Chuẩn mô tả tài sản và điều kiện để ghép nối bản sao số

Về mặt chuẩn hóa, xu hướng hiện nay là mô tả tài sản số theo cấu trúc thống nhất, tiêu biểu là vô quản trị tài sản trong hệ sinh thái Plattform Industrie 4.0, nhằm bảo đảm bản sao số của thiết bị từ các nhà cung cấp khác nhau có thể ghép nối thành bản sao số cấp hệ thống.

Đây chính là điểm giao giữa trụ cột bản sao số và trụ cột tích hợp, và hàm ý của nó rất thực tế: không có chuẩn mô tả tài sản chung thì bản sao số cấp hệ thống không khả thi về mặt kinh tế. Khi

mỗi thiết bị mô tả bản thân theo một cấu trúc riêng, việc ghép mười thiết bị lại đòi hỏi bốn mươi lăm cặp ánh xạ dữ liệu, và con số này tăng theo bình phương số thiết bị. Vì vậy, yêu cầu nhà cung cấp cung cấp mô tả tài sản theo chuẩn mở nên trở thành một điều khoản mua sắm chuẩn chứ không phải một mong muốn kỹ thuật.

ĐIỂM CẦN NHỚ

Câu hỏi thẩm định một đề xuất bản sao số không phải là mô hình có chính xác không, mà là **quyết định nào sẽ được đưa ra khác đi nhờ mô hình này, và giá trị của việc quyết định khác đi là bao nhiêu**. Kèm theo đó là hai câu hỏi bổ sung thường bị bỏ quên: ai sẽ tái hiệu chuẩn mô hình và với tần suất nào, và doanh nghiệp có quyền truy cập dữ liệu thô để tự kiểm chứng kết quả hay không.



2.6. Sản xuất bồi đắp và thực tại mở rộng trong vận hành

2.6.1. Bốn ứng dụng có giá trị vận hành của sản xuất bồi đắp

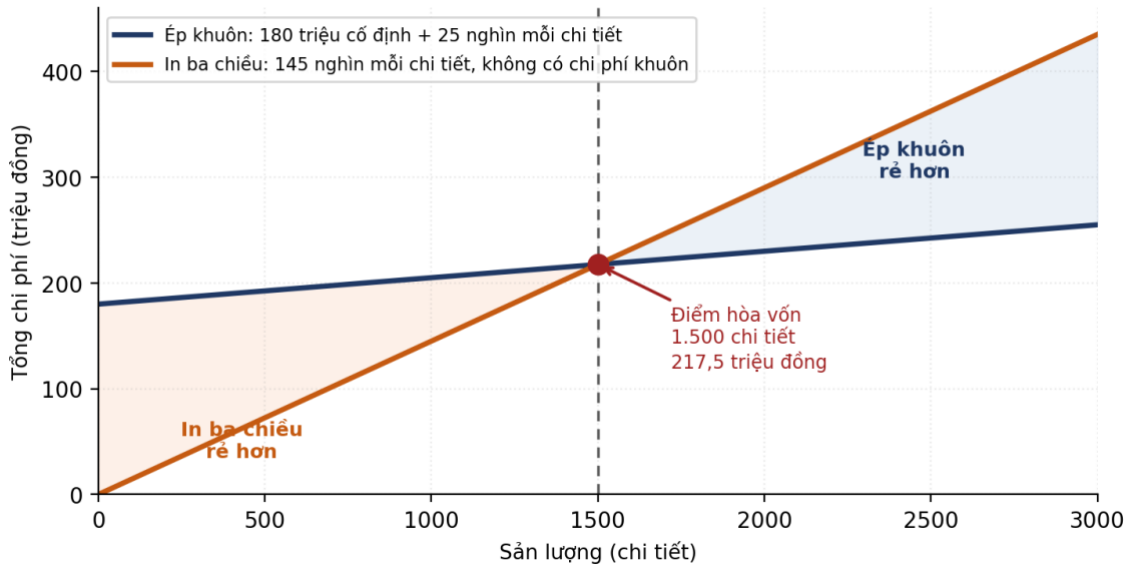
Sản xuất bồi đắp, thường được gọi là in ba chiều, là trụ cột dễ bị thổi phồng nhất trong khung chín trụ cột. Thực tế, công nghệ này hiếm khi cạnh tranh được với gia công truyền thống ở sản lượng lớn, nhưng lại vượt trội trong bốn tình huống cụ thể.

Bảng 2.11. Bốn ứng dụng có giá trị vận hành của sản xuất bồi đắp

Ứng dụng	Cơ chế tạo giá trị	Chỉ số vận hành cải thiện	Điều kiện thành công
Tạo mẫu nhanh	Rút ngắn chu kỳ từ thiết kế tới mẫu vật lý từ hàng tuần xuống vài ngày	Thời gian phát triển sản phẩm	Quy trình phê duyệt mẫu được rút gọn tương ứng, nếu không thì lợi ích bị triệt tiêu
Chế tạo đồ gá và dụng cụ hỗ trợ	Tự chế tạo đồ gá riêng cho từng mã hàng với chi phí thấp	Thời gian chuyển đổi, chất lượng thao tác	Năng lực thiết kế nội bộ và người vận hành được tham gia thiết kế đồ gá
Phụ tùng thay thế theo yêu cầu	Sản xuất tại chỗ phụ tùng hiếm, thay cho tồn kho hoặc chờ nhập khẩu	Thời gian dừng máy, giá trị tồn kho phụ tùng	Có mô hình số của phụ tùng; vật liệu đạt yêu cầu kỹ thuật và được nghiệm thu
Chi tiết hình học phức tạp	Chế tạo kết cấu không thể gia công bằng phương pháp trừ vật liệu	Khối lượng sản phẩm, hiệu năng kỹ thuật	Thiết kế được tối ưu riêng cho sản xuất bồi đắp thay vì sao chép thiết kế cũ

Bài toán thẩm định kinh tế của sản xuất bồi đắp luôn quy về so sánh cấu trúc chi phí: phương pháp truyền thống có chi phí cố định cao và chi phí biến đổi thấp, còn sản xuất bồi đắp có chi phí cố định gần bằng không và chi phí biến đổi cao. Hai đường tổng chi phí vì vậy luôn cắt nhau tại một điểm hòa vốn, và toàn bộ quyết định phụ thuộc vào vị trí của sản lượng dự kiến so với điểm đó.

SO SÁNH TỔNG CHI PHÍ THEO SẢN LƯỢNG



Hình 2.10. So sánh tổng chi phí giữa sản xuất bồi đắp và ép khuôn theo sản lượng

Nguồn: Tác giả tính toán và biên vẽ theo số liệu giả định của ví dụ dưới đây.

VÍ DỤ TÍNH ĐIỂM HÒA VỐN GIỮA SẢN XUẤT BỒI ĐẮP VÀ ÉP KHUÔN

Bài toán. Một chi tiết nhựa có hai phương án chế tạo. *Phương án ép khuôn*: chi phí chế tạo khuôn 180 triệu đồng là chi phí cố định, chi phí biến đổi 25.000 đồng mỗi chi tiết. *Phương án in ba chiều*: không có chi phí khuôn, chi phí biến đổi 145.000 đồng mỗi chi tiết.

Tính toán. Gọi Q là sản lượng. Tổng chi phí ép khuôn bằng $180.000.000 + 25.000Q$. Tổng chi phí in ba chiều bằng $145.000Q$. Điểm hòa vốn thỏa mãn $180.000.000$ bằng tích của hiệu 145.000 trừ 25.000 với Q , suy ra **Q bằng 1.500 chi tiết**, tương ứng tổng chi phí 217,5 triệu đồng cho cả hai phương án.

Diễn giải quản trị. Dưới 1.500 chi tiết, in ba chiều rẻ hơn; trên ngưỡng đó, ép khuôn chiếm ưu thế và khoảng cách nói rộng nhanh.

Nhưng kết luận này chưa đầy đủ. Cần bổ sung ba yếu tố mà phép tính chi phí đơn thuần bỏ sót. Thứ nhất là *thời gian*: chế tạo khuôn mất khoảng bốn đến sáu tuần trong khi in ba chiều cho sản phẩm trong vài ngày, nên nếu đơn hàng gấp thì ngưỡng hòa vốn thực tế dịch chuyển. Thứ hai là *rủi ro thiết kế*: nếu thiết kế chưa chốt thì đầu tư khuôn trở thành chi phí chìm. Thứ ba là *tính linh hoạt*: in ba chiều cho phép thay đổi thiết kế giữa chừng mà không phát sinh chi phí khuôn mới.

Đây là minh họa cho nguyên tắc của Chương 1 rằng quyết định công nghệ phải được đánh giá trên cả bốn mục tiêu vận hành chứ không chỉ trên chi phí.

2.6.2. Thực tại tăng cường và thực tại ảo trong vận hành

Thực tại tăng cường chồng thông tin số lên trường nhìn thực, còn thực tại ảo tạo môi trường mô phỏng hoàn toàn. Trong nhà máy, giá trị của chúng nằm ở việc đưa đúng thông tin tới đúng

người, đúng thời điểm và đúng vị trí không gian, qua đó giảm lỗi thao tác và rút ngắn thời gian học nghề.

Bảng 2.12. Ứng dụng thực tại tăng cường và thực tại ảo trong vận hành

Ứng dụng	Công nghệ phù hợp	Chỉ số vận hành cải thiện	Giới hạn thực tế
Hướng dẫn lắp ráp theo bước	Thực tại tăng cường trên máy tính bảng hoặc kính	Tỷ lệ đạt lần đầu; thời gian chu kỳ của công nhân mới	Chi phí số hóa và cập nhật nội dung hướng dẫn theo mỗi thay đổi thiết kế
Đào tạo an toàn và quy trình nguy hiểm	Thực tại ảo	Thời gian đào tạo; số sự cố an toàn	Chi phí phát triển kịch bản; cảm giác khó chịu khi đeo thiết bị lâu
Bảo trì từ xa có chuyên gia hỗ trợ	Thực tại tăng cường kết hợp truyền hình ảnh trực tiếp	Thời gian dừng máy; chi phí điều chuyên gia	Yêu cầu băng thông và độ ổn định mạng; vấn đề bảo mật hình ảnh xưởng
Kiểm tra chất lượng có hỗ trợ trực quan	Thực tại tăng cường kết hợp thị giác máy	Tỷ lệ bỏ sót lỗi	Điều kiện ánh sáng và độ ổn định của môi trường xưởng

Điểm quản trị cần lưu ý là chi phí lớn nhất của một dự án thực tại tăng cường không nằm ở phần cứng mà nằm ở việc tạo lập và duy trì nội dung số. Mỗi lần thay đổi thiết kế sản phẩm hoặc quy trình, toàn bộ hướng dẫn phải được cập nhật. Doanh nghiệp có tần suất thay đổi mã hàng cao cần tính chi phí duy trì này vào luận chứng kinh tế ngay từ đầu, và cần xác định rõ bộ phận nào sở hữu nội dung số cũng như quy trình phê duyệt phiên bản.

2.7. Phổ tự động hóa và bài toán lựa chọn mức tự động hóa

2.7.1. Năm bậc của phổ tự động hóa

Bảng 2.13. Năm bậc của phổ tự động hóa và đặc trưng kinh tế

Bậc	Mô tả	Chi phí đầu tư	Chi phí đơn vị ở sản lượng cao	Khả năng đáp ứng đa dạng sản phẩm
Thủ công	Con người thực hiện toàn bộ thao tác	Rất thấp	Cao	Rất cao
Cơ khí hóa	Máy hỗ trợ, người điều khiển từng thao tác	Thấp	Trung bình đến cao	Cao
Tự động cứng	Dây chuyền chuyên dụng cho một sản phẩm	Rất cao	Rất thấp	Rất thấp
Tự động linh hoạt	Hệ thống có thể tái lập trình để chạy nhiều mã hàng	Cao	Thấp đến trung bình	Trung bình đến cao
Tự động thích ứng	Hệ thống tự nhận diện sản phẩm và tự điều chỉnh tham số	Cao, kèm chi phí dữ liệu và mô hình	Thấp	Cao

Bậc thứ năm là điểm giao giữa tự động hóa truyền thống và nhà máy thông minh: nó không chỉ đòi hỏi cơ khí và điều khiển mà còn đòi hỏi dữ liệu, mô hình và khả năng ra quyết định. Đây là lý do một doanh nghiệp không thể mua mức tự động thích ứng như mua một cỗ máy; nó là kết quả tích lũy của cả bốn lĩnh vực cấu trúc doanh nghiệp đã nêu trong mô hình acatech ở Chương 1, gồm nguồn lực, hệ thống thông tin, cấu trúc tổ chức và văn hóa.

2.7.2. Ma trận sản lượng và đa dạng sản phẩm

Công cụ kinh điển để chọn mức tự động hóa là ma trận hai chiều, trong đó trục hoành là sản lượng theo mã hàng và trục tung là mức độ đa dạng sản phẩm.

MA TRẬN SẢN LƯỢNG VÀ ĐA DẠNG SẢN PHẨM



Hình 2.11. Ma trận sản lượng và đa dạng sản phẩm với mức tự động hóa phù hợp

Nguồn: Tác giả phát triển từ khung phân loại hệ thống sản xuất của Groover (2020).

Với ô sản lượng thấp và đa dạng cao, tức xưởng theo đơn hàng, mức phù hợp là thủ công có hỗ trợ số và cơ khí hóa, kết hợp ứng dụng công tác cho các công đoạn nặng nhọc. Nguyên tắc ưu tiên ở ô này là số hóa thông tin trước khi tự động hóa thao tác, vì bài toán thực sự thường nằm ở việc đưa đúng bản vẽ, đúng thông số và đúng thứ tự công việc tới người thợ chứ không nằm ở tốc độ tay nghề.

Với ô sản lượng trung bình và đa dạng trung bình, tức sản xuất theo lô, mức phù hợp là tự động linh hoạt với robot có thể tái lập trình và hệ thống chuyển đổi nhanh. Với ô sản lượng cao và đa dạng thấp, tự động cứng cho hiệu quả chi phí cao nhất nhưng chịu rủi ro lỗi thời khi sản phẩm thay đổi. Cuối cùng, ô sản lượng cao và đa dạng cao, tức cá biệt hóa hàng loạt, là ô khó nhất và cũng là ô mà công nghệ 4.0 tạo ra khác biệt lớn nhất thông qua tự động thích ứng và khả năng cấu hình lại bằng phần mềm.

2.7.3. Bẫy tự động hóa quá mức

Tự động hóa không phải là hàm đơn điệu tăng của hiệu quả. Ba cơ chế dưới đây khiến mức tự động hóa vượt ngưỡng tối ưu gây thiệt hại thay vì tạo lợi ích.

Mất tính linh hoạt. Hệ thống tự động cứng có chi phí chuyển đổi rất cao. Khi vòng đời sản phẩm ngắn lại, tài sản chưa khấu hao hết đã trở nên lỗi thời, và doanh nghiệp phải lựa chọn giữa việc tiếp tục sản xuất sản phẩm thị trường không còn cần hoặc chấp nhận một khoản tổn thất tài sản lớn.

Chuyển dịch chứ không loại bỏ chi phí. Chi phí lao động trực tiếp giảm nhưng chi phí bảo trì, kỹ thuật, phụ tùng và năng lực lập trình tăng. Ở nhiều doanh nghiệp Việt Nam, năng lực bảo trì thiết bị tự động là nút thắt thực sự chứ không phải vốn đầu tư: một hệ thống tự động dừng ba ngày chờ chuyên gia nước ngoài sẽ xóa sạch phần tiết kiệm của cả quý.

Nghịch lý mỉa mai của tự động hóa. Khi hệ thống tự động vận hành tốt, người vận hành mất dần kỹ năng xử lý thủ công; nhưng chính họ lại là người được kỳ vọng can thiệp khi hệ thống hỏng, tức là ở tình huống khó nhất với kỹ năng đã mai một nhất. Hàm ý quản trị là phải duy trì chương trình huấn luyện định kỳ tình huống bất thường ngay cả khi hệ thống chạy ổn định, và phải coi chi phí huấn luyện này là chi phí vận hành bắt buộc chứ không phải khoản có thể cắt giảm.



2.8. Robot công nghiệp, ứng dụng cộng tác và logistics nội bộ tự hành

2.8.1. Robot công nghiệp truyền thống và ứng dụng cộng tác

Bảng 2.14. So sánh robot công nghiệp truyền thống và ứng dụng robot cộng tác

Tiêu chí	Robot công nghiệp truyền thống	Ứng dụng robot cộng tác
Bố trí an toàn	Rào chắn cố định, vùng làm việc tách biệt hoàn toàn với người	Chung không gian với người; an toàn dựa trên giới hạn lực, tốc độ và giám sát khoảng cách
Tải trọng và tốc độ	Cao	Thấp đến trung bình; tốc độ bị giới hạn vì lý do an toàn
Chi phí đầu tư trọn gói	Cao, phần lớn nằm ở tích hợp và hệ thống an toàn	Thấp hơn đáng kể; thời gian triển khai ngắn
Thời gian lập trình lại	Dài, cần chuyên gia	Ngắn, có thể dạy bằng thao tác dẫn hướng trực tiếp
Phù hợp với	Sản lượng lớn, chu kỳ ổn định	Sản lượng vừa và nhỏ, nhiều mã hàng, công đoạn phụ trợ
Rủi ro chính	Đầu tư lớn bị lỗi thời khi đổi sản phẩm	Kỳ vọng vượt quá năng lực thực tế về tải trọng và nhịp sản xuất

Về khung tiêu chuẩn an toàn, cần cập nhật một thay đổi quan trọng. Bộ tiêu chuẩn ISO 10218 phiên bản 2025, gồm phần một về thiết kế robot và phần hai về tích hợp ứng dụng robot, đã thay thế phiên bản năm 2011 và hợp nhất nội dung của ISO/TS 15066, vốn trước đây là một quy định kỹ thuật riêng về an toàn robot cộng tác, vào trong bộ tiêu chuẩn chính. Phiên bản mới cũng lần đầu đưa yêu cầu an ninh mạng vào phạm vi an toàn robot, làm rõ các yêu cầu về an toàn chức năng và bổ sung phân loại robot.

Đáng chú ý về mặt khái niệm, phiên bản 2025 không còn dùng thuật ngữ robot cộng tác mà dùng thuật ngữ ứng dụng cộng tác. Thay đổi thuật ngữ này không mang tính hình thức mà phản ánh một nguyên lý an toàn quan trọng: an toàn là thuộc tính của cách sử dụng robot trong một ứng dụng cụ thể, không phải thuộc tính cố hữu của bản thân robot. Một robot được quảng cáo là cobot nhưng gắn dao cắt hoặc mỏ hàn vẫn có thể tạo ra ứng dụng nguy hiểm. Hàm ý quản trị là đánh giá rủi ro phải được thực hiện cho từng ứng dụng chứ không thể suy ra từ nhãn sản phẩm, và phải được đánh giá lại khi thay đổi chương trình, dụng cụ đầu công tác, tải trọng hoặc bố trí ô làm việc.

BỐN PHƯƠNG THỨC AN TOÀN TRONG ỨNG DỤNG CỘNG TÁC



Hình 2.12. Bốn phương thức an toàn trong ứng dụng cộng tác giữa người và robot

Nguồn: Tác giả biên soạn theo ISO 10218 phiên bản 2025, phân tích hợp ứng dụng robot, kế thừa nội dung ISO/TS 15066.

2.8.2. Quy trình bảy bước triển khai một ứng dụng cộng tác an toàn

Vì an toàn là thuộc tính của ứng dụng chứ không của thiết bị, doanh nghiệp cần một quy trình chuẩn hóa thay vì dựa vào cam kết của nhà cung cấp. Quy trình bảy bước dưới đây phản ánh logic đánh giá rủi ro của bộ tiêu chuẩn hiện hành và cần được lưu hồ sơ đầy đủ để phục vụ kiểm tra và điều tra sự cố nếu có.

QUY TRÌNH BẢY BƯỚC TRIỂN KHAI MỘT ỨNG DỤNG CỘNG TÁC AN TOÀN



Bước 7 là bước bị bỏ qua nhiều nhất trong thực tiễn. Đánh giá rủi ro một lần khi nghiệm thu rồi coi như hoàn tất là sai lầm, vì mọi thay đổi nhỏ về dụng cụ hoặc chi tiết đều có thể làm thay đổi toàn bộ hồ sơ rủi ro.

Hình 2.13. Quy trình bảy bước triển khai một ứng dụng cộng tác an toàn

Nguồn: Tác giả xây dựng theo tinh thần ISO 10218 phiên bản 2025 và nguyên tắc đánh giá rủi ro máy móc của ISO 12100.

Bước thứ bảy là bước thường bị bỏ qua nhất trong thực tiễn. Nhiều doanh nghiệp thực hiện đánh giá rủi ro một lần khi nghiệm thu rồi coi như hoàn tất, trong khi bất kỳ thay đổi nào về dụng cụ đầu công tác hoặc về chi tiết gia công đều có thể làm thay đổi hoàn toàn hồ sơ rủi ro của ứng dụng. Biện pháp thực hành tốt là gắn yêu cầu đánh giá lại vào quy trình quản lý thay đổi của nhà máy, sao cho không một thay đổi nào được phê duyệt mà không đi qua bước rà soát an toàn.

2.8.3. Logistics nội bộ với xe dẫn đường tự động và robot di động tự hành

Bảng 2.15. So sánh xe dẫn đường tự động và robot di động tự hành

Tiêu chí	Xe dẫn đường tự động	Robot di động tự hành
Nguyên lý điều hướng	Bám theo hạ tầng dẫn đường cố định như băng từ, đường vạch hoặc phản xạ laser	Tự định vị và lập bản đồ; tự tìm đường tới đích
Xử lý vật cản	Dừng lại chờ cho tới khi vật cản được dọn đi	Tự tính đường vòng để tiếp tục nhiệm vụ
Chi phí hạ tầng ban đầu	Cao vì phải lắp đặt hệ dẫn đường trên toàn tuyến	Thấp, chủ yếu là chi phí thiết bị
Chi phí thay đổi tuyến	Cao, phải sửa hạ tầng vật lý	Thấp, chỉ cập nhật bản đồ số
Phù hợp với	Tuyến vận chuyển ổn định lâu dài, lưu lượng lớn	Bố trí mặt bằng thay đổi thường xuyên, nhiều tuyến khác nhau
Rủi ro chính	Lỗi thời khi bố trí lại mặt bằng	Hiệu năng giảm trong môi trường đông người và lối đi hẹp

Nguyên tắc lựa chọn có thể phát biểu ngắn gọn: khi mặt bằng ổn định, hãy đầu tư vào hạ tầng; khi mặt bằng thay đổi, hãy đầu tư vào khả năng tự định vị. Sai lầm phổ biến là chọn theo mức độ hiện đại của công nghệ thay vì theo mức độ ổn định của bố trí sản xuất.

2.8.4. Bài toán quyết định đầu tư ứng dụng cộng tác

VÍ DỤ TÍNH HOÀN VỐN DỰ ÁN ỨNG DỤNG CỘNG TÁC

Bối cảnh. Công đoạn bốc dỡ và xếp sản phẩm vào khay hiện do 2 công nhân mỗi ca đảm nhiệm, nhà máy chạy 2 ca mỗi ngày, tổng cộng 4 vị trí lao động. Chi phí lao động đầy đủ gồm lương, bảo hiểm, phúc lợi và quản lý là 12 triệu đồng mỗi người mỗi tháng.

Phương án đầu tư. Robot cộng tác kèm bộ gắp, hệ thống thị giác, chi phí tích hợp và đánh giá rủi ro an toàn: 850 triệu đồng. Chi phí vận hành hằng năm gồm điện, bảo trì, phụ tùng và hiệu chỉnh:

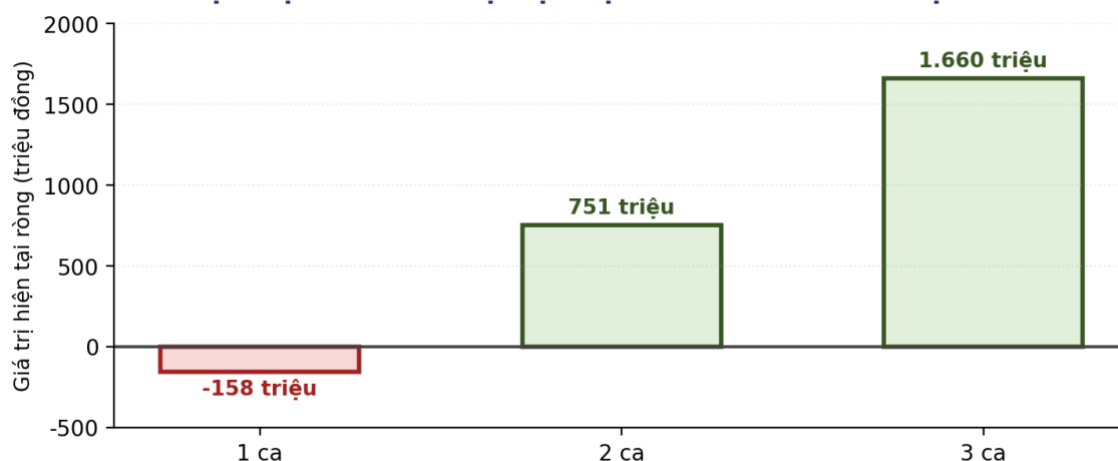
60 triệu đồng. Cần bố trí 0,5 vị trí giám sát và xử lý ngoại lệ với chi phí 72 triệu đồng mỗi năm. Vòng đời dự án 5 năm, suất chiết khấu 12 phần trăm mỗi năm, tương ứng hệ số hiện giá dòng tiền đều 5 năm là 3,6048.

Tính toán. Chi phí lao động hiện tại bằng tích của 4, 12 và 12, tức 576 triệu đồng mỗi năm. Dòng tiền tiết kiệm ròng bằng 576 trừ 60 trừ 72, tức **444 triệu đồng mỗi năm**. Thời gian hoàn vốn giản đơn bằng 850 chia 444, xấp xỉ **1,91 năm, tức khoảng 23 tháng**. Giá trị hiện tại ròng bằng tích của 444 và 3,6048 trừ 850, xấp xỉ **751 triệu đồng**.

Phân tích độ nhạy. Nếu nhà máy chỉ chạy **1 ca**, chi phí lao động hiện tại chỉ còn 288 triệu đồng mỗi năm; giả sử chi phí vận hành giữ nguyên 60 triệu và chi phí giám sát giảm còn 36 triệu, dòng tiền tiết kiệm chỉ còn 192 triệu đồng mỗi năm, thời gian hoàn vốn kéo dài lên **4,43 năm** và giá trị hiện tại ròng chỉ còn khoảng âm 158 triệu đồng, tức **dự án không khả thi**. Ngược lại, nếu nhà máy chạy **3 ca** với 6 vị trí lao động và chi phí giám sát 108 triệu, dòng tiền tiết kiệm đạt 696 triệu đồng mỗi năm và giá trị hiện tại ròng vượt 1.600 triệu đồng.

Kết luận quản trị. Biến số quyết định tính khả thi của dự án robot không phải là giá robot mà là **số ca vận hành**, tức mức độ khai thác tài sản. Đây là lý do các dự án tự động hóa thường được triển khai trước ở những nhà máy chạy nhiều ca. Ba yếu tố khác cần đưa vào thẩm định nhưng khó lượng hóa gồm: cải thiện ổn định chất lượng, giảm rủi ro chấn thương cơ xương khớp do thao tác lặp lại, và khả năng tuyển dụng lao động cho công đoạn nặng nhọc trong dài hạn.

ĐỘ NHẠY CỦA GIÁ TRỊ HIỆN TẠI RÒNG THEO SỐ CA VẬN HÀNH



Cùng một mức đầu tư 850 triệu đồng, dự án chỉ khả thi khi nhà máy vận hành từ hai ca trở lên.

Hình 2.14. Độ nhạy của giá trị hiện tại ròng theo số ca vận hành

Nguồn: Tác giả tính toán và biên vẽ theo số liệu của ví dụ trên.

2.9. Hệ thống điều hành sản xuất và vai trò trung tâm trong nhà máy

2.9.1. Mười một chức năng theo khung MESA

Hệ thống điều hành sản xuất, viết tắt là MES, hay theo cách gọi rộng hơn là quản lý vận hành sản xuất, viết tắt là MOM, nằm ở Cấp 3 của tháp ISA 95 đã học ở Chương 1. Vị trí này giải thích vai trò của nó: MES là lớp phiên dịch giữa kế hoạch và thực thi, chuyển lệnh sản xuất từ ERP thành chỉ dẫn cụ thể cho từng máy, từng ca và từng người, đồng thời chuyển dữ liệu thực thi ngược lên thành thông tin quản trị.

Bảng 2.16. Mười một chức năng của MES theo khung MESA

Chức năng	Nội dung	Giá trị quản trị trực tiếp
Điều độ chi tiết	Sắp xếp thứ tự công việc trên từng nguồn lực	Giảm thời gian chờ và thời gian chuyển đổi
Quản lý nguồn lực	Theo dõi trạng thái và năng lực máy, người, dụng cụ	Tránh giao việc cho nguồn lực không sẵn sàng
Điều phối đơn vị sản xuất	Phân bổ và điều chỉnh công việc theo thời gian thực	Phản ứng nhanh với sự cố phát sinh trong ca
Thu thập và tiếp nhận dữ liệu	Lấy dữ liệu từ thiết bị và từ người vận hành	Nền tảng của mọi chỉ số vận hành
Quản lý tài liệu	Cung cấp bản vẽ, hướng dẫn và tiêu chuẩn đúng phiên bản tại nơi làm việc	Giảm lỗi do dùng sai tài liệu
Truy vết sản phẩm và phá hệ	Ghi nhận lịch sử chế tạo của từng lô và từng đơn vị sản phẩm	Điều kiện bắt buộc để thu hồi có mục tiêu và để đáp ứng yêu cầu khách hàng
Quản lý chất lượng	Ghi nhận kết quả kiểm tra, kiểm soát quá trình, xử lý sản phẩm không phù hợp	Phát hiện sớm lệch chuẩn trước khi sinh phế phẩm hàng loạt
Quản lý quá trình	Giám sát và điều chỉnh thông số công nghệ	Ổn định quá trình và giảm phương sai
Quản lý bảo trì	Lập kế hoạch và ghi nhận hoạt động bảo trì	Tăng khả dụng thiết bị
Quản lý lao động	Theo dõi năng lực, chứng chỉ và hiệu suất nhân sự	Bố trí đúng người vào đúng công đoạn
Phân tích hiệu suất	Tính toán và trình bày các chỉ số vận hành	Chuyển dữ liệu thành quyết định

Ba chức năng thường bị bỏ qua khi triển khai nhưng lại tạo giá trị lớn nhất trong bối cảnh Việt Nam là truy vết sản phẩm, vốn là điều kiện để tham gia chuỗi cung ứng của khách hàng lớn và để

đáp ứng yêu cầu xuất khẩu; quản lý tài liệu, giúp giảm lỗi do dùng sai phiên bản hướng dẫn; và quản lý lao động theo năng lực, vốn là nút thắt thực tế ở nhiều nhà máy có biến động nhân sự cao.

2.9.2. Phân vai giữa ERP, APS, MES và SCADA

Bảng 2.17. Phân vai giữa bốn lớp hệ thống theo chu kỳ quyết định

Hệ thống	Câu hỏi trả lời	Chu kỳ quyết định	Hậu quả nếu thiếu lớp này
ERP	Sản xuất gì, số lượng bao nhiêu, giao khi nào, mua nguyên liệu ra sao	Tuần đến tháng	Kế hoạch tách rời tài chính và mua hàng; tồn kho mất kiểm soát
APS	Kế hoạch có khả thi với năng lực thực tế không; nên ưu tiên đơn nào	Ngày đến tuần	Kế hoạch bất khả thi bị đẩy xuống xưởng, sinh ra kế hoạch ngảm của quản đốc
MES và MOM	Ai làm gì, trên máy nào, theo thứ tự nào, kết quả thực tế ra sao	Phút đến giờ	Không có dữ liệu thực thi; báo cáo dựa trên ghi chép thủ công, trễ và sai lệch
SCADA và PLC	Thiết bị đang ở trạng thái nào; cần tác động điều khiển gì	Mili giây đến giây	Không có dữ liệu nguồn; không thể điều khiển và giám sát quá trình

KIẾN TRÚC CHỨC NĂNG BỐN LỚP VÀ LƯỒNG DỮ LIỆU HAI CHIỀU



Hình 2.15. Kiến trúc chức năng ERP, APS, MES và SCADA cùng luồng dữ liệu hai chiều

Nguồn: Tác giả xây dựng trên cơ sở IEC 62264 và khung chức năng của Manufacturing Enterprise Solutions Association.

Sai lầm phổ biến nhất là kỳ vọng ERP làm thay vai trò của MES. ERP được thiết kế cho chu kỳ quyết định tính bằng ngày và tuần; buộc nó xử lý dữ liệu ở cấp phút sẽ dẫn tới hai hệ quả là hệ thống quá tải và người vận hành nhập liệu đối phó khiến chất lượng dữ liệu suy giảm. Ngược lại, triển khai MES khi quy trình sản xuất chưa được chuẩn hóa cũng thất bại, vì MES là hệ thống thực thi nên nó chỉ có thể thực thi những gì đã được định nghĩa rõ ràng.

2.9.3. Quy trình sáu bước triển khai hệ thống điều hành sản xuất

Tỷ lệ dự án MES không đạt kỳ vọng cao hơn đáng kể so với các loại dự án phần mềm khác, và nguyên nhân hầu như luôn nằm ở giai đoạn trước khi phần mềm được cài đặt. Quy trình dưới đây đặt trọng tâm vào hai bước chuẩn bị mà nhiều doanh nghiệp bỏ qua vì chúng không thuộc phạm vi hợp đồng với nhà cung cấp.

QUY TRÌNH SÁU BƯỚC TRIỂN KHAI HỆ THỐNG ĐIỀU HÀNH SẢN XUẤT



Hình 2.16. Quy trình sáu bước triển khai hệ thống điều hành sản xuất

Nguồn: Tác giả xây dựng, có tham chiếu khung chức năng của Manufacturing Enterprise Solutions Association và IEC 62264.

Bước năm, tức vận hành song song, thường gây tranh cãi vì nó làm tăng khối lượng công việc trong giai đoạn chuyển đổi. Tuy nhiên đây chính là bước tạo ra niềm tin vào hệ thống. Khi con số do hệ thống sinh ra khớp với con số do người vận hành tự ghi trong nhiều tuần liên tiếp, sổ tay song song mới thực sự biến mất. Cắt bỏ bước này để tiết kiệm thời gian gần như luôn dẫn tới tình trạng hệ thống được nghiệm thu nhưng không được tin dùng.

2.10. Tinh gọn 4.0: số hóa các công cụ sản xuất tinh gọn

2.10.1. Ba công cụ tinh gọn được số hóa

Andon số. Hệ thống báo hiệu bất thường truyền thống dùng đèn và còi. Phiên bản số bổ sung ba năng lực: tự động phát hiện bất thường từ dữ liệu máy thay vì chờ người bấm nút; định tuyến cảnh báo tới đúng người theo ma trận trách nhiệm và mức độ leo thang; và lưu vết toàn bộ lịch sử để phân tích Pareto nguyên nhân dừng chuyền.

Poka yoke số, tức chống sai lỗi bằng phương tiện số. Cơ cấu chống nhầm cơ khí được bổ sung bằng kiểm tra số: quét mã vạch xác nhận đúng vật tư trước khi cho phép máy chạy; thị giác máy kiểm tra sự hiện diện và vị trí chi tiết; khóa liên động phần mềm không cho chuyển sang bước tiếp theo nếu bước trước chưa được xác nhận. Ưu điểm quyết định của cách tiếp cận này là chống lỗi ngay tại nguồn thay vì phát hiện lỗi ở khâu kiểm tra cuối.

Kiểm soát quá trình bằng thống kê thời gian thực. Biểu đồ kiểm soát truyền thống được lập thủ công theo mẫu định kỳ với độ trễ tính bằng giờ. Khi dữ liệu đo được thu thập tự động, biểu đồ kiểm soát cập nhật liên tục, cho phép phát hiện xu hướng trôi dạt trước khi sản phẩm vượt giới hạn quy định, qua đó chuyển kiểm soát chất lượng từ trạng thái phản ứng sang trạng thái phòng ngừa.

2.10.2. Ảnh xạ bảy loại lãng phí với công nghệ số

Bảng 2.18. Bảy loại lãng phí và công nghệ số tương ứng

Loại lãng phí	Biểu hiện trong nhà máy	Công nghệ số hỗ trợ giảm thiểu	Điều kiện tiên quyết
Sản xuất thừa	Sản xuất trước nhu cầu để giữ máy chạy	Tín hiệu kéo điện tử; dữ liệu nhu cầu thời gian thực	Kế hoạch và điều độ được liên thông
Chờ đợi	Chờ vật tư, chờ máy, chờ phê duyệt	Theo dõi tiến độ thời gian thực; cảnh báo thiếu vật tư	Dữ liệu tồn kho chính xác
Vận chuyển	Di chuyển vật tư không cần thiết	Robot di động tự hành; tối ưu tuyến vận chuyển nội bộ	Bố trí mặt bằng đã được rà soát
Gia công thừa	Làm nhiều hơn mức khách hàng yêu cầu	Phân tích dữ liệu quá trình để xác định tham số vừa đủ	Hiểu rõ yêu cầu kỹ thuật của khách hàng
Tồn kho	Vốn bị giam trong nguyên liệu và bán thành phẩm	Theo dõi sản phẩm dở dang thời gian thực; dự báo tốt hơn	Định luật Little được áp dụng trong điều độ
Thao tác thừa	Di chuyển và tìm kiếm không tạo giá trị	Phân tích thao tác bằng thị giác máy; hướng dẫn bằng thực tại tăng cường	Chuẩn hóa thao tác trước

Loại lãng phí	Biểu hiện trong nhà máy	Công nghệ số hỗ trợ giảm thiểu	Điều kiện tiên quyết
Sản phẩm lỗi	Phế phẩm và làm lại	Kiểm soát quá trình bằng thống kê thời gian thực; poka yoke số; kiểm tra tự động	Hệ thống đo lường đủ tin cậy

2.10.3. Nguyên tắc ổn định trước, số hóa sau

Đây là nguyên tắc quan trọng nhất của mục này và cần được ghi nhớ như một quy tắc thumb định bắt buộc: số hóa một quy trình lãng phí chỉ tạo ra lãng phí nhanh hơn và tốn kém hơn.

Cơ chế của hiện tượng này gồm ba bước. Bước một, quy trình chưa ổn định tạo ra dữ liệu có phương sai lớn và nhiều ngoại lệ. Bước hai, hệ thống số phải xử lý các ngoại lệ đó bằng cách bổ sung logic đặc biệt, khiến hệ thống phức tạp lên nhanh chóng và chi phí triển khai tăng vọt. Bước ba, khi quy trình thay đổi, toàn bộ logic đặc biệt phải được viết lại và dự án rơi vào trạng thái bảo trì vĩnh viễn.

TRÌNH TỰ NĂM BƯỚC CỦA LEAN 4.0

Phạm vi sản xuất tinh gọn cổ điển, vốn đầu tư thấp

Phạm vi công nghệ số, vốn đầu tư cao



**Số hóa một quy trình lãng phí chỉ tạo ra lãng phí nhanh hơn và tốn kém hơn.
Nguyên tắc bắt buộc: ổn định trước, số hóa sau.**

Hình 2.17. Trình tự năm bước của tinh gọn 4.0

Nguồn: Tác giả xây dựng, có tham chiếu tổng quan về quan hệ giữa Công nghiệp 4.0 và sản xuất tinh gọn của Buer, Strandhagen và Chan (2018).

Trong trình tự này, ba bước đầu thuộc phạm vi sản xuất tinh gọn cổ điển và thường tốn ít vốn nhất nhưng lại tạo phần lớn cải thiện ban đầu. Đối với doanh nghiệp nhỏ và vừa Việt Nam đang ở giai đoạn 1 hoặc 2 của thang acatech, đây chính là chiến lược chi phí thấp và giá trị nhanh có hiệu quả kinh tế cao nhất.

ĐIỂM CẦN NHỚ

Ba câu hỏi cần đặt trước khi phê duyệt bất kỳ dự án số hóa nào ở cấp công đoạn.

Thứ nhất, quy trình này đã có tài liệu chuẩn và được tuân thủ nhất quán chưa?

Thứ hai, nếu quy trình được chuẩn hóa mà không cần công nghệ thì bao nhiêu phần trăm lợi ích kỳ vọng đã đạt được?

Thứ ba, chúng ta đang số hóa một quy trình đúng hay đang cố định hóa một quy trình sai bằng phần mềm?

Câu hỏi thứ ba là câu hỏi tốn kém nhất nếu bị bỏ qua, vì phần mềm khiến quy trình sai trở nên khó thay đổi hơn nhiều so với khi nó còn nằm trên giấy.



2.11. An ninh mạng công nghiệp và quản trị dữ liệu

2.11.1. Hội tụ giữa công nghệ thông tin và công nghệ vận hành

Nguyên lý nền tảng của mục này đã được nêu ở Chương 1 và cần được nhắc lại vì tầm quan trọng của nó: mọi quyết định kết nối đều đồng thời là một quyết định về rủi ro an ninh. Mỗi thiết bị được đưa lên mạng và mỗi giao diện được mở giữa mạng vận hành với mạng doanh nghiệp đều mở rộng bề mặt tấn công.

Hệ thống công nghệ vận hành có ba đặc điểm khiến chúng dễ tổn thương hơn hệ thống công nghệ thông tin thông thường. Thứ nhất, vòng đời thiết bị rất dài, thường từ 15 đến 25 năm, nên nhiều thiết bị chạy hệ điều hành và phần mềm không còn được hỗ trợ. Thứ hai, việc dừng máy để vá lỗi rất tốn kém nên bản vá thường bị trì hoãn vô thời hạn. Thứ ba, nhiều giao thức công nghiệp ra đời trong bối cảnh mạng cô lập nên không có cơ chế xác thực.

Bảng 2.19. Khác biệt ưu tiên an ninh giữa môi trường công nghệ thông tin và công nghệ vận hành

Tiêu chí	Môi trường công nghệ thông tin	Môi trường công nghệ vận hành
Thứ tự ưu tiên	Bảo mật, toàn vẹn, sẵn sàng	Sẵn sàng, toàn vẹn, bảo mật
Hậu quả sự cố nghiêm trọng nhất	Rò rỉ dữ liệu	Mất an toàn cho con người và thiết bị
Vòng đời thiết bị	3 đến 5 năm	15 đến 25 năm
Cửa sổ vá lỗi	Thường xuyên, có thể tự động	Hiếm, phải trùng với dừng máy kế hoạch
Yêu cầu thời gian thực	Thấp	Rất cao; độ trễ vài mili giây có thể gây sự cố
Chủ sở hữu trong tổ chức	Phòng công nghệ thông tin	Phòng kỹ thuật, bảo trì và sản xuất

Bốn nhóm rủi ro cần được nhận diện và lượng hóa riêng biệt. Giá đoạn sản xuất có thiệt hại đo bằng chi phí dừng máy và đơn hàng trễ. Mất an toàn con người là rủi ro không thể quy đổi hoàn toàn thành tiền và phải được xử lý theo nguyên tắc phòng ngừa. Mất sở hữu trí tuệ liên quan tới bản vẽ, công thức và thông số công nghệ, đặc biệt quan trọng với doanh nghiệp gia công cho khách hàng quốc tế. Rò rỉ dữ liệu cá nhân liên quan tới dữ liệu người lao động và dữ liệu sinh trắc học dùng cho chấm công cùng kiểm soát ra vào.

2.11.2. IEC 62443 và nguyên tắc phòng vệ nhiều lớp

Bộ tiêu chuẩn IEC 62443 là khung tham chiếu quốc tế cho an ninh hệ thống tự động hóa và điều khiển công nghiệp. Ba khái niệm cốt lõi cần nắm ở cấp độ quản trị được trình bày dưới đây.

Phân vùng và ống dẫn. Hệ thống được chia thành các vùng gồm những tài sản có yêu cầu an ninh tương đương; mọi luồng dữ liệu giữa các vùng phải đi qua ống dẫn được kiểm soát. Nguyên tắc này bảo đảm rằng một vùng bị xâm nhập không lan sang toàn hệ thống, và đây chính là ứng dụng của tư duy phòng vệ nhiều lớp.

Mức độ an ninh. Mỗi vùng được gán một mức an ninh mục tiêu tùy theo hậu quả nếu bị xâm phạm, từ mức chỉ chống vi phạm ngẫu nhiên tới mức chống tấn công có chủ đích với nguồn lực lớn. Cách tiếp cận phân mức này cho phép phân bổ ngân sách an ninh theo rủi ro thay vì bảo vệ đồng đều mọi thứ.

Trách nhiệm phân chia ba bên. Tiêu chuẩn phân định rõ nghĩa vụ của chủ sở hữu tài sản, nhà tích hợp hệ thống và nhà cung cấp sản phẩm. Hàm ý hợp đồng rất cụ thể: yêu cầu an ninh phải được đưa vào điều khoản mua sắm và nghiệm thu, không thể bổ sung sau khi hệ thống đã vận hành.

MÔ HÌNH PHÂN VÙNG VÀ ỐNG DẪN TRONG MỘT NHÀ MÁY ĐIỆN HÌNH



Hình 2.18. Mô hình phân vùng và ống dẫn theo IEC 62443 trong một nhà máy điện hình

Nguồn: Tác giả biên vẽ theo bộ tiêu chuẩn IEC 62443.

Bảng 2.20. Bảy nhóm yêu cầu nền tảng của IEC 62443 và câu hỏi kiểm tra tương ứng

Nhóm yêu cầu nền tảng	Câu hỏi kiểm tra tại nhà máy
Kiểm soát định danh và xác thực	Mỗi người và mỗi thiết bị truy cập hệ thống có định danh riêng không, hay dùng chung một tài khoản?
Kiểm soát sử dụng	Quyền truy cập có được cấp theo nguyên tắc tối thiểu cần thiết không?

Nhóm yêu cầu nền tảng	Câu hỏi kiểm tra tại nhà máy
Toàn vẹn hệ thống	Có cơ chế phát hiện thay đổi trái phép đối với chương trình điều khiển không?
Bảo mật dữ liệu	Dữ liệu nhạy cảm khi truyền và khi lưu có được mã hóa không?
Hạn chế luồng dữ liệu	Mạng vận hành đã được phân tách khỏi mạng văn phòng chưa?
Phản ứng kịp thời với sự kiện	Có nhật ký sự kiện và có ai thực sự xem nhật ký đó không?
Sẵn sàng của tài nguyên	Có phương án sao lưu, phục hồi và vận hành ở chế độ suy giảm không?

2.11.3. Quy trình sáu bước xây dựng chương trình an ninh mạng công nghiệp

An ninh mạng công nghiệp không phải là một sản phẩm mua về mà là một chương trình được duy trì liên tục. Sáu bước dưới đây là mức tối thiểu mà một nhà máy đang kết nối cần thực hiện, và mỗi bước đều tạo ra sản phẩm có thể kiểm tra được.

QUY TRÌNH SÁU BƯỚC XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH AN NINH MẠNG CÔNG NGHIỆP



Hình 2.19. Quy trình sáu bước xây dựng chương trình an ninh mạng công nghiệp

Nguồn: Tác giả xây dựng theo cấu trúc của bộ tiêu chuẩn IEC 62443.

Điểm cần nhấn mạnh về mặt kinh tế là bước thứ tư. Việc gán mức an ninh mục tiêu khác nhau cho từng vùng cho phép doanh nghiệp tập trung ngân sách vào vùng điều khiển và an toàn, nơi hậu quả xấu nhất là mất an toàn con người, thay vì trải mỏng nguồn lực trên toàn bộ hệ thống. Đây cũng là lập luận thuyết phục nhất khi trình bày ngân sách an ninh trước ban giám đốc, vì nó chuyển cuộc thảo luận từ mức chi tiêu sang mức rủi ro chấp nhận được.

2.11.4. Quản trị dữ liệu và khung pháp lý Việt Nam

Quản trị dữ liệu trả lời bốn câu hỏi mà mọi nhà máy thông minh đều phải có câu trả lời rõ ràng. Ai sở hữu dữ liệu của từng loại tài sản, đặc biệt khi thiết bị do nhà cung cấp nước ngoài lắp đặt và dữ liệu được truyền về nền tảng đám mây của họ? Ai được truy cập loại dữ liệu nào? Siêu dữ liệu, tức thông tin mô tả nguồn gốc, đơn vị đo, độ tin cậy và lịch sử hiệu chuẩn, có được lưu cùng dữ liệu không? Và dữ liệu được lưu bao lâu, xóa theo quy trình nào?

Vấn đề quyền sở hữu dữ liệu thiết bị đặc biệt đáng lưu ý trong bối cảnh Việt Nam, nơi phần lớn thiết bị sản xuất được nhập khẩu. Điều khoản hợp đồng cần làm rõ ngay từ khi mua thiết bị ba nội dung: doanh nghiệp có quyền truy cập dữ liệu thô của máy mình hay chỉ được xem qua giao diện của nhà cung cấp; dữ liệu có được phép sao lưu tại chỗ không; và điều gì xảy ra với dữ liệu lịch sử khi chấm dứt hợp đồng dịch vụ.

Bảng 2.21. Khung pháp lý Việt Nam liên quan tới dữ liệu và an toàn thông tin trong nhà máy

Văn bản	Nội dung liên quan tới nhà máy	Nghĩa vụ phát sinh
Luật An toàn thông tin mạng	Bảo đảm an toàn thông tin cho hệ thống thông tin; phân loại cấp độ hệ thống	Xác định cấp độ an toàn của hệ thống điều khiển; áp dụng phương án bảo vệ tương ứng
Luật An ninh mạng	Bảo vệ hệ thống thông tin quan trọng về an ninh quốc gia; yêu cầu về lưu trữ dữ liệu	Doanh nghiệp thuộc lĩnh vực trọng yếu phải tuân thủ yêu cầu bổ sung
Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân, Luật số 91/2025/QH15, hiệu lực từ ngày 1 tháng 1 năm 2026	Xác lập quyền của chủ thể dữ liệu gồm quyền được biết, quyền đồng ý, quyền truy cập, chỉnh sửa và yêu cầu xóa dữ liệu; nghiêm cấm mua bán dữ liệu cá nhân	Rà soát toàn bộ dữ liệu người lao động, dữ liệu sinh trắc học dùng cho chấm công và kiểm soát ra vào, dữ liệu camera giám sát; xây dựng cơ chế lấy đồng ý và xử lý yêu cầu xóa dữ liệu; xử lý dữ liệu người lao động sau khi chấm dứt hợp đồng

Lưu ý: thông tin pháp lý trong Bảng 2.21 phản ánh trạng thái tại thời điểm biên soạn là tháng 8 năm 2026. Giảng viên và người học cần rà soát văn bản hiện hành cùng các nghị định hướng dẫn trước khi áp dụng vào tình huống thực tế.

ĐIỂM CẦN NHỚ

Nhà máy thông minh thu thập rất nhiều dữ liệu về **con người** chứ không chỉ về máy: hình ảnh camera phân tích thao tác, dữ liệu vân tay hoặc khuôn mặt để chấm công, dữ liệu năng suất theo từng cá nhân, dữ liệu định vị trong xưởng. Từ ngày 1 tháng 1 năm 2026, những dữ liệu này thuộc phạm vi điều chỉnh của Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân. Vì vậy, đánh giá tác động về bảo vệ dữ liệu cá nhân cần được thực hiện **trong giai đoạn thiết kế dự án** chứ không phải sau khi hệ thống đã vận hành, đúng theo nguyên tắc bảo vệ dữ liệu ngay từ khâu thiết kế.



2.12. Con người trong nhà máy thông minh

2.12.1. Khái niệm Operator 4.0 và Operator 5.0

Khung chín trụ cột không đề cập tới con người, và đây là khoảng trống lớn nhất của nó. Khái niệm Operator 4.0, được Romero và cộng sự (2016) hệ thống hóa, ra đời để lấp khoảng trống này: người vận hành không bị thay thế mà được tăng cường năng lực bằng công nghệ. Các dạng tăng cường bao gồm tăng cường sức mạnh bằng thiết bị hỗ trợ ngoại khung hoặc cần cầu trợ lực; tăng cường nhận thức bằng thực tại tăng cường hiển thị thông tin tại chỗ và trợ lý ảo; tăng cường phân tích bằng bảng điều khiển cùng công cụ chẩn đoán; và tăng cường cộng tác thông qua làm việc chung với robot.

Operator 5.0 phát triển thêm một bước, đặt trọng tâm vào phúc lợi và khả năng phục hồi của người lao động: thiết kế công việc nhằm giảm gánh nặng thể chất và nhận thức, bảo đảm quyền tự chủ trong công việc, và duy trì ý nghĩa của lao động con người trong hệ thống tự động hóa cao. Đây chính là nội dung cụ thể hóa định hướng lấy con người làm trung tâm của Công nghiệp 5.0 đã nêu ở Chương 1.

Lập luận này được củng cố bởi quan sát của Budde và cộng sự (2023) rằng nhà máy thông minh chỉ thành công khi kết hợp được năng lực con người với năng lực công nghệ, và rằng việc chấp nhận tầm nhìn số của lực lượng lao động cùng việc tích hợp tri thức ngầm của người thợ tại hiện trường là những yếu tố sống còn. Nói cách khác, con người trong nhà máy thông minh không chỉ là đối tượng chịu tác động của công nghệ mà còn là nguồn tri thức mà không hệ thống nào tự thu thập được.

2.12.2. Ma trận kỹ năng mới

Bảng 2.22. Ma trận kỹ năng cho người lao động trong nhà máy thông minh

Nhóm kỹ năng	Nội dung cụ thể	Mức yêu cầu theo vị trí	Hình thức phát triển phù hợp
Kỹ năng chuyên môn nền	Hiểu quá trình công nghệ, vận hành và bảo trì cơ bản thiết bị	Cao ở vị trí vận hành và bảo trì	Đào tạo tại chỗ, kèm cấp
Đọc hiểu dữ liệu	Đọc biểu đồ kiểm soát, hiểu chỉ số vận hành, phân biệt biến động ngẫu nhiên với xu hướng	Cao ở tổ trưởng và quản đốc; trung bình ở công nhân	Khóa ngắn kết hợp thực hành trên dữ liệu thật của nhà máy
Tư duy hệ thống	Hiểu tác động của quyết định cục bộ lên toàn dòng giá trị	Cao ở cấp quản lý sản xuất	Mô phỏng, trò chơi vận hành, luân chuyển vị trí
Cộng tác giữa người và máy	Làm việc an toàn và hiệu quả cùng robot và hệ thống tự động; biết khi nào cần can thiệp	Cao ở vị trí trực tiếp	Huấn luyện trên thiết bị thật, diễn tập tình huống bất thường

Nhóm kỹ năng	Nội dung cụ thể	Mức yêu cầu theo vị trí	Hình thức phát triển phù hợp
An ninh và kỷ luật dữ liệu	Nhận biết rủi ro, tuân thủ quy định truy cập, không dùng thiết bị ngoài luồng	Cao ở mọi vị trí có truy cập hệ thống	Đào tạo định kỳ, diễn tập sự cố
Giải quyết vấn đề có cấu trúc	Phân tích nguyên nhân gốc dựa trên dữ liệu thay vì dựa trên phỏng đoán	Cao ở tổ trưởng trở lên	Dự án cải tiến thực tế có kèm cố vấn

2.12.3. Nâng cấp kỹ năng, tái đào tạo và vấn đề bất bình đẳng

Cần phân biệt hai chiến lược. Nâng cấp kỹ năng là nâng cao năng lực trong cùng một vai trò nghề nghiệp, chẳng hạn công nhân vận hành học đọc dữ liệu và xử lý cảnh báo. Tái đào tạo là chuyển đổi sang vai trò khác, chẳng hạn công nhân ở công đoạn được tự động hóa chuyển sang vị trí bảo trì hoặc kiểm soát chất lượng.

Bằng chứng thực nghiệm không ủng hộ luận điểm cực đoan nào về tác động việc làm. Điều được ghi nhận nhất quán hơn là sự dịch chuyển cấu trúc kỹ năng và một hệ quả phân phối cần được đối diện thẳng thắn: lợi ích của tự động hóa có xu hướng tập trung vào nhóm lao động có kỹ năng cao, trong khi chi phí điều chỉnh rơi vào nhóm lao động thực hiện thao tác lặp lại, vốn thường là nhóm có ít nguồn lực nhất để tự tái đào tạo. Đây là lý do định hướng lấy con người làm trung tâm của Công nghiệp 5.0 không chỉ là vấn đề đạo đức mà còn là vấn đề quản trị rủi ro xã hội và rủi ro danh tiếng của doanh nghiệp.

Công cụ thực hành để triển khai định hướng này là ma trận phân công nhiệm vụ giữa người và máy, xây dựng theo hai chiều là mức độ lặp lại của nhiệm vụ và mức độ đòi hỏi phán đoán.

MA TRẬN PHÂN CÔNG NHIỆM VỤ GIỮA NGƯỜI VÀ MÁY



Hình 2.20. Ma trận phân công nhiệm vụ giữa người và máy

Nguồn: Tác giả xây dựng, có tham chiếu khung Operator 4.0 của Romero và cộng sự (2016).

Trong bối cảnh Việt Nam có ba hàm ý thực tiễn. Thứ nhất, doanh nghiệp cần lập bản đồ kỹ năng hiện tại và kỹ năng mục tiêu trước khi triển khai tự động hóa, để xác định số lao động cần tái đào tạo và thời gian cần thiết. Thứ hai, chi phí đào tạo phải được đưa vào luận chứng kinh tế của dự án tự động hóa chứ không tách rời. Thứ ba, cần có lộ trình chuyển đổi công bố trước cho người lao động, vì sự bất định về việc làm là nguồn đề kháng thay đổi mạnh nhất.

HỢP TRANH BIỆN CÓ CẤU TRÚC

Đề bài. Một doanh nghiệp sản xuất có 200 công nhân trực tiếp và ngân sách đầu tư 10 tỷ đồng. Ban giám đốc phân vân giữa hai phương án. Phương án **A** là đầu tư toàn bộ vào hệ thống robot và tự động hóa cho ba công đoạn nặng nhọc nhất. Phương án **B** là đầu tư vào chương trình tái đào tạo và nâng cấp kỹ năng cho toàn bộ 200 công nhân, kết hợp số hóa chi phí thấp.

Cách tổ chức. Chia lớp thành hai phe, mỗi phe chuẩn bị 15 phút, tranh biện 20 phút, phản biện chéo 10 phút.

Yêu cầu bắt buộc đối với cả hai phe. Nêu rõ giả định về ngành, sản lượng, số ca và vòng đời sản phẩm, vì kết luận phụ thuộc hoàn toàn vào các giả định này; đưa ra ít nhất một phép tính định lượng; và chỉ ra rủi ro lớn nhất của chính phương án mình bảo vệ.

Kết luận sư phạm mà giảng viên cần dẫn dắt. Câu hỏi robot hay con người là một lưỡng phân sai. Câu hỏi đúng là *phân bổ ngân sách theo tỷ lệ nào và theo trình tự nào*, và câu trả lời phụ thuộc vào mức trưởng thành hiện tại của nhà máy. Một doanh nghiệp ở giai đoạn 1 hoặc 2 của thang acatech mà đầu tư toàn bộ vào robot gần như chắc chắn sẽ rơi vào bẫy công nghệ vượt năng lực tổ chức.

2.13. Tổng hợp: lộ trình bốn giai đoạn tích hợp các trụ cột công nghệ

Mười hai mục trước đã trình bày từng thành phần. Mục này ghép chúng lại thành một lộ trình duy nhất, nhằm trả lời câu hỏi mà nhà quản trị đặt ra ngay từ đầu chương: bắt đầu từ đâu và theo thứ tự nào.



Hình 2.21. Lộ trình bốn giai đoạn tích hợp các trụ cột công nghệ

Nguồn: Tác giả tổng hợp từ nội dung Chương 2, có tham chiếu mô thức triển khai theo trình tự của Frank, Dalenogare và Ayala (2019) và khung trưởng thành acatech (2020).

Giai đoạn một, ổn định nền. Chuẩn hóa quy trình, thống nhất từ điển dữ liệu và kiểm kê tài sản mạng. Giai đoạn này gần như không cần vốn công nghệ nhưng quyết định toàn bộ chi phí của ba giai đoạn sau. Nội dung tương ứng nằm ở mục 2.10 và mục 2.11.

Giai đoạn hai, dựng lỗ dữ liệu. Thu thập tự động, hạ tầng mạng cùng cổng biên, và phân vùng an ninh. Đây là giai đoạn xây dựng lớp cảm nhận và lớp mạng của kiến trúc bốn lớp ở Hình 2.4, đồng thời thực hiện ba bước đầu của quy trình dữ liệu ở Hình 2.5.

Giai đoạn ba, liên thông. Tích hợp dọc và ngang, triển khai hệ thống điều hành sản xuất, và xây dựng bóng số ở cấp quy trình. Đây là giai đoạn mà nhà máy lần đầu tiên nhìn thấy trạng thái thực của mình theo thời gian thực, và cũng là giai đoạn mà phần lớn giá trị quản trị được tạo ra.

Giai đoạn bốn, khai thác nâng cao. Bản sao số cấp hệ thống, tự động thích ứng và mở rộng ứng dụng cộng tác. Chỉ tới giai đoạn này thì các trụ cột thuộc lớp vỏ ở Hình 2.2 mới thực sự phát huy hết giá trị.

Nguyên tắc cuối cùng cần được nhấn mạnh: một nhà máy có thể chạy nhiều trường hợp sử dụng song song, nhưng không thể bỏ qua một giai đoạn. Đầu tư vào giai đoạn bốn khi giai đoạn một

chưa hoàn tất là dạng thất bại tốn kém nhất, vì nó vừa mất tiền vừa tạo ra niềm tin sai lệch rằng công nghệ không hiệu quả.

2.14. Tóm tắt chương

Chương 2 đã chuyển từ khái niệm sang cấu trúc công nghệ của nhà máy thông minh, theo bốn lớp lập luận nối tiếp nhau.

Về công cụ tư duy, chương thiết lập khung thẩm định bốn bước gồm cơ chế tạo giá trị, điều kiện áp dụng, giới hạn và luận chứng kinh tế. Khung chín trụ cột được trình bày cùng ba giới hạn của nó: phân loại theo công nghệ chứ không theo bài toán quản trị, các trụ cột không đồng cấp, và bỏ qua con người cùng tổ chức. Phân tích cấu trúc cho thấy năm trụ cột mang tính hạ tầng dữ liệu và bốn trụ cột là ứng dụng khai thác hạ tầng đó, từ đó gợi ý trình tự đầu tư đi từ lõi ra ngoài. Khung định vị trường hợp sử dụng theo giai đoạn quy trình và mức độ tiên liệu phân tích bổ khuyết cho giới hạn thứ nhất, đồng thời xác lập nguyên tắc rằng năng lực dự báo không thể xây khi chưa có năng lực chẩn đoán.

Về điều kiện kỹ thuật nền, chương trình bày kiến trúc bốn lớp của hệ thống IoT công nghiệp, tiêu chí phân bổ tải xử lý giữa biên và đám mây, cùng quy trình bảy bước đưa dữ liệu từ hiện trường tới bản sao số, trong đó hai bước chuẩn hóa và gán nhãn ngữ cảnh là hai bước bị cắt bỏ nhiều nhất và gây hậu quả nặng nhất. Ba chiều tích hợp gồm chiều dọc trong nội bộ, chiều ngang xuyên chuỗi giá trị và chiều vòng đời sản phẩm. Sáu dạng thất bại tích hợp đều có dấu hiệu nhận biết sớm cùng biện pháp phòng ngừa, trong đó nguyên tắc quan trọng nhất là quyết định kiến trúc dữ liệu phải đi trước quyết định chọn nhà cung cấp. Quy trình sáu bước ở Hình 2.7 chuẩn hóa cách thẩm định một đề xuất công nghệ và loại bỏ sớm những đề xuất không đạt.

Về các cụm công nghệ cụ thể, bản sao số cần được phân biệt với mô hình số và bóng số theo hướng cùng mức tự động của luồng dữ liệu, và chỉ có giá trị khi thỏa mãn năm điều kiện dữ liệu, trong đó cơ chế cập nhật mô hình là điều kiện thường bị bỏ qua nhất. Sản xuất bồi đắp có bốn ứng dụng vận hành rõ ràng và cần được thẩm định bằng phân tích điểm hòa vốn kết hợp với ba yếu tố phi chi phí. Phổ tự động hóa năm bậc kết hợp ma trận sản lượng và đa dạng sản phẩm cho phép chọn mức tự động hóa phù hợp, đồng thời cảnh báo ba cơ chế của bẫy tự động hóa quá mức. Về robot, bộ tiêu chuẩn ISO 10218 phiên bản 2025 đã hợp nhất ISO/TS 15066 và chuyển trọng tâm từ robot cộng tác sang ứng dụng cộng tác, hàm ý rằng đánh giá rủi ro phải thực hiện cho từng ứng dụng cụ thể theo quy trình bảy bước ở Hình 2.13. Bài toán hoàn vốn ứng dụng cộng tác cho thấy biến số quyết định không phải giá thiết bị mà là số ca vận hành. Hệ thống MES và MOM giữ vai trò lớp phiên dịch giữa kế hoạch và thực thi với mười một chức năng theo khung MESA, và được triển khai theo quy trình sáu bước trong đó hai bước chuẩn bị quyết định thành bại.

Về ba điều kiện nền, tinh gọn 4.0 số hóa các công cụ tinh gọn cổ điển gồm andon, poka yoke và kiểm soát quá trình bằng thống kê, nhưng phải tuân thủ trình tự năm bước: chuẩn hóa, ổn định, đo lường, số hóa rồi mới tự động hóa. An ninh mạng công nghiệp đòi hỏi nhận thức về đảo ngược thứ tự ưu tiên giữa môi trường công nghệ thông tin và công nghệ vận hành, áp dụng nguyên tắc phân vùng, phân mức an ninh cùng phân chia trách nhiệm ba bên theo IEC 62443, và được triển khai theo quy trình sáu bước ở Hình 2.19. Quản trị dữ liệu phải trả lời rõ bốn câu hỏi về quyền sở hữu, quyền truy cập, siêu dữ liệu và vòng đời lưu trữ, đồng thời tuân thủ khung pháp lý Việt Nam, đặc biệt là Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân có hiệu lực từ ngày 1 tháng 1 năm 2026 đối với dữ liệu người lao động. Và con người, với khái niệm Operator 4.0 cùng Operator 5.0, ma trận sáu nhóm kỹ năng mới và hai chiến lược nâng cấp kỹ năng cùng tái đào tạo, là yếu tố mà không công nghệ nào thay thế được trong vai trò chịu trách nhiệm giải trình cuối cùng.

Toàn bộ nội dung được tổng hợp thành lộ trình bốn giai đoạn ở Hình 2.21, với nguyên tắc khép lại chương: ổn định trước, số hóa sau, bởi số hóa một quy trình lãng phí chỉ tạo ra lãng phí nhanh hơn và tốn kém hơn.

2.15. Thuật ngữ trọng tâm

Bảng 2.23. Thuật ngữ trọng tâm Chương 2

Thuật ngữ	Giải thích ngắn
Nine pillars of Industry 4.0	Khung chín trụ cột công nghệ; là danh mục phương án chứ không phải danh mục nhiệm vụ.
Use case	Trường hợp sử dụng; đơn vị lựa chọn và đầu tư thực sự, thay cho công nghệ đơn lẻ.
Degree of analytical foresight	Mức độ tiên liệu phân tích, từ nền tảng, mô tả, chẩn đoán, dự báo tới khuyến nghị và tự chủ.
Edge computing và cloud computing	Điện toán biên và điện toán đám mây; hai phương án phân bổ tài xử lý theo độ trễ, khối lượng và mức nhạy cảm của dữ liệu.
Vertical và horizontal integration	Tích hợp dọc trong nội bộ; tích hợp ngang xuyên chuỗi giá trị.
End to end engineering và digital thread	Tích hợp dữ liệu liên tục theo vòng đời từ thiết kế tới thải bỏ.
Digital model, digital shadow và digital twin	Ba mức số hóa mô hình, phân biệt theo hướng và mức tự động của luồng dữ liệu.
Asset Administration Shell	Vỏ quản trị tài sản; chuẩn mô tả tài sản số, điều kiện để ghép bản sao số cấp hệ thống.

Thuật ngữ	Giải thích ngắn
Additive manufacturing	Sản xuất bồi đắp; lợi thế ở sản lượng thấp, hình học phức tạp và phụ tùng theo yêu cầu.
Breakeven quantity	Sản lượng hòa vốn giữa hai phương án có cấu trúc chi phí khác nhau.
AR, VR và XR	Thực tại tăng cường, thực tại ảo và thực tại mở rộng; giá trị nằm ở đưa đúng thông tin tới đúng vị trí.
Flexible Manufacturing System	Hệ thống tự động linh hoạt, tái lập trình được cho nhiều mã hàng.
Collaborative application	Ứng dụng cộng tác giữa người và robot; an toàn là thuộc tính của ứng dụng chứ không của robot.
ISO 10218 phiên bản 2025	Bộ tiêu chuẩn an toàn robot công nghiệp bản 2025, đã hợp nhất ISO/TS 15066.
AGV và AMR	Xe dẫn đường tự động theo hạ tầng cố định và robot di động tự hành tự định vị.
MES và MOM	Hệ thống điều hành sản xuất; lớp phiên dịch giữa kế hoạch và thực thi.
MESA	Khung mười một chức năng chuẩn của hệ thống điều hành sản xuất.
APS	Hệ thống hoạch định và điều độ nâng cao, kiểm tra tính khả thi của kế hoạch theo năng lực.
Lean 4.0	Tinh gọn 4.0; số hóa và tăng cường công cụ tinh gọn bằng dữ liệu thời gian thực.
Poka yoke số	Cơ chế chống sai lỗi dựa trên kiểm tra số ngay tại nguồn.
Zones and conduits	Phân vùng an ninh và ống dẫn kiểm soát luồng dữ liệu theo IEC 62443.
Security level	Mức an ninh mục tiêu gán cho từng vùng theo hậu quả nếu bị xâm phạm.
IT and OT convergence	Hội tụ công nghệ thông tin và công nghệ vận hành; đảo ngược thứ tự ưu tiên an ninh.
Operator 4.0 và Operator 5.0	Người vận hành được công nghệ tăng cường năng lực; trọng tâm là phúc lợi và khả năng phục hồi.
Upskilling và reskilling	Nâng cao năng lực trong cùng vai trò và chuyển đổi sang vai trò nghề nghiệp khác.

CÂU HỎI VÀ BÀI TẬP CHƯƠNG 2

A. Câu hỏi ôn tập

1. Trình bày khung thẩm định bốn bước ở Hình 2.1. Vì sao bước thứ ba, tức xác định giới hạn và rủi ro, lại là bước bị bỏ qua nhiều nhất trong các đề xuất do nhà cung cấp trình bày?
2. Nêu chín trụ cột công nghệ của nhà máy thông minh. Trình bày ba giới hạn của khung chín trụ cột và giải thích vì sao chúng có thể dẫn tới sai lệch ưu tiên đầu tư.
3. Vì sao có thể nói năm trụ cột tạo thành lõi hạ tầng dữ liệu còn bốn trụ cột là ứng dụng? Hàm ý của nhận xét này đối với trình tự đầu tư là gì?
4. Vì sao không nên cộng dồn số ô đánh giá Cao trong Bảng 2.3 để kết luận công nghệ nào tốt nhất?
5. Vì sao đầu tư an ninh mạng phải được thẩm định theo logic tổn thất kỳ vọng tránh được thay vì logic lợi ích tăng thêm?
6. Trình bày năm mức độ tiên liệu phân tích. Vì sao không thể xây dựng năng lực dự báo khi chưa có năng lực chẩn đoán?
7. Định vị ba trường hợp sử dụng sau trên khung ở Hình 2.3 và giải thích: giám sát tình trạng thiết bị, dự báo chất lượng, tự động lập lịch công việc.
8. Trình bày bốn lớp của kiến trúc IoT công nghiệp. Với mỗi lớp, nêu một câu hỏi thẩm định mà nhà quản trị cần đặt ra.
9. Nêu bốn tiêu chí lựa chọn giữa xử lý tại biên và xử lý trên đám mây. Với ứng dụng khóa liên động an toàn trên máy ép, bạn chọn phương án nào và vì sao?
10. Trình bày quy trình bảy bước ở Hình 2.5. Điều gì xảy ra nếu bước gán nhãn ngữ cảnh bị bỏ qua?
11. Phân biệt tích hợp theo chiều dọc, chiều ngang và theo vòng đời sản phẩm. Với mỗi chiều, nêu một câu hỏi quản trị chỉ trả lời được sau khi tích hợp thành công.
12. Trình bày sáu dạng thất bại tích hợp. Vì sao thất bại ngữ nghĩa là dạng khó khắc phục nhất sau khi đã xảy ra?
13. Trình bày quy trình sáu bước thẩm định một đề xuất công nghệ ở Hình 2.7. Vì sao bước thứ tư là bước phân biệt một chương trình có kiến trúc với một tập hợp dự án rời rạc?
14. Phân biệt mô hình số, bóng số và bản sao số. Vì sao việc gọi nhầm bóng số thành bản sao số lại là vấn đề quản trị chứ không chỉ là vấn đề thuật ngữ?
15. Nêu năm điều kiện dữ liệu để bản sao số có giá trị. Vì sao điều kiện về cơ chế cập nhật mô hình lại thường bị bỏ qua và hậu quả là gì?

16. Trình bày quy trình sáu bước ở Hình 2.9. Vì sao bước đầu tiên lại không phải là một bước kỹ thuật?
17. Vì sao không có chuẩn mô tả tài sản chung thì bản sao số cấp hệ thống không khả thi về mặt kinh tế?
18. Trong tình huống nào sản xuất bồi đắp có lợi thế kinh tế rõ ràng so với gia công truyền thống? Nêu ba yếu tố phi chi phí mà phân tích điểm hòa vốn bỏ sót.
19. Vì sao chi phí lớn nhất của một dự án thực tại tăng cường thường không nằm ở phần cứng?
20. Trình bày năm bậc của phổ tự động hóa. Vì sao bậc tự động thích ứng không thể mua được như một cỗ máy?
21. Giải thích ba cơ chế của bầy tự động hóa quá mức. Nghịch lý mĩa mai của tự động hóa là gì và biện pháp phòng ngừa ra sao?
22. So sánh robot công nghiệp truyền thống với ứng dụng robot cộng tác trên năm tiêu chí.
23. Vì sao phiên bản ISO 10218 năm 2025 thay thuật ngữ robot cộng tác bằng thuật ngữ ứng dụng cộng tác? Hàm ý quản trị của thay đổi này là gì?
24. Trình bày bốn phương thức an toàn trong ứng dụng cộng tác. Với công đoạn xếp sản phẩm nặng 12 kg vào khay, bạn chọn phương thức nào và vì sao?
25. Trình bày quy trình bảy bước triển khai một ứng dụng cộng tác an toàn. Vì sao bước cuối cùng thường bị bỏ qua nhất trong thực tiễn?
26. So sánh xe dẫn đường tự động và robot di động tự hành. Trong điều kiện nào bạn khuyến nghị xe dẫn đường tự động thay vì robot di động tự hành?
27. Nêu mười một chức năng của MES theo khung MESA. Ba chức năng nào thường bị bỏ qua khi triển khai nhưng tạo giá trị lớn trong bối cảnh Việt Nam?
28. Phân vai ERP, APS, MES và SCADA theo chu kỳ quyết định. Điều gì xảy ra khi doanh nghiệp kỳ vọng ERP làm thay vai trò của MES?
29. Trình bày quy trình sáu bước triển khai hệ thống điều hành sản xuất. Vì sao bước vận hành song song lại không nên bị cắt bỏ dù làm tăng khối lượng công việc?
30. Trình bày ba công cụ tinh gọn được số hóa và giá trị bổ sung mà số hóa mang lại cho từng công cụ.
31. Giải thích nguyên tắc ổn định trước, số hóa sau theo cơ chế ba bước. Nêu ba câu hỏi thẩm định bắt buộc trước khi phê duyệt một dự án số hóa cấp công đoạn.
32. Chọn ba trong bảy loại lãng phí và nêu công nghệ số tương ứng cùng điều kiện tiên quyết để công nghệ đó phát huy tác dụng.

33. Vì sao thứ tự ưu tiên an ninh trong môi trường công nghệ vận hành lại đảo ngược so với môi trường công nghệ thông tin? Nêu ba đặc điểm khiến hệ thống công nghệ vận hành dễ tổn thương.

34. Trình bày ba khái niệm cốt lõi của IEC 62443. Hàm ý hợp đồng của nguyên tắc phân chia trách nhiệm ba bên là gì?

35. Trình bày quy trình sáu bước xây dựng chương trình an ninh mạng công nghiệp. Vì sao bước gán mức an ninh mục tiêu lại có ý nghĩa kinh tế quan trọng?

36. Nêu bốn câu hỏi mà quản trị dữ liệu phải trả lời. Vì sao vấn đề quyền sở hữu dữ liệu thiết bị lại đặc biệt quan trọng với doanh nghiệp Việt Nam?

37. Những loại dữ liệu cá nhân nào phát sinh trong một nhà máy thông minh? Nghĩa vụ nào phát sinh theo Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân có hiệu lực từ ngày 1 tháng 1 năm 2026?

38. Phân biệt Operator 4.0 và Operator 5.0. Nêu bốn dạng tăng cường năng lực người vận hành.

39. Dựa trên Hình 2.20, hãy phân loại bốn nhiệm vụ sau vào bốn ô của ma trận và giải thích: cấp phôi cho máy ép, xử lý khiếu nại chất lượng của khách hàng, kiểm tra ngoại quan theo tiêu chuẩn cố định, và điều độ lại chuyển khi có sự cố.

40. Phân biệt nâng cấp kỹ năng và tái đào tạo. Vì sao chi phí đào tạo phải nằm trong luận chứng kinh tế của dự án tự động hóa?

41. Trình bày lộ trình bốn giai đoạn ở Hình 2.21. Vì sao có thể chạy song song nhiều trường hợp sử dụng nhưng không thể bỏ qua một giai đoạn?

42. Hãy bình luận nhận định sau: đầu tư vào robot và đầu tư vào con người là hai lựa chọn loại trừ nhau.

B. Bài tập vận dụng

Bài 1. Ma trận trụ cột và mục tiêu. Chọn một trong ba bối cảnh sau: xưởng may gia công với 800 lao động và 40 mã hàng mỗi tháng; nhà máy sản xuất linh kiện nhựa chạy 3 ca với 6 mã hàng; hoặc nhà máy chế biến thủy sản xuất khẩu sang Liên minh châu Âu. Hãy lập ma trận chín trụ cột và bốn mục tiêu vận hành cho bối cảnh đã chọn, chấm mức tác động Cao, Trung bình hoặc Thấp, và bảo vệ ba ô mà bạn cho điểm khác với Bảng 2.3 bằng lập luận gắn với đặc thù bối cảnh.

Bài 2. Định vị trường hợp sử dụng. Với bối cảnh đã chọn ở Bài 1, hãy đặt năm trường hợp sử dụng mà bạn cho là ưu tiên cao nhất lên khung ở Hình 2.3.

- Nêu rõ ô của từng trường hợp theo giai đoạn quy trình và mức độ tiên liệu phân tích.
- Xác định trường hợp nào đòi hỏi năng lực nền chưa sẵn có và cần bổ sung gì.
- Sắp xếp năm trường hợp theo thứ tự triển khai và lập luận cho thứ tự đó.

Bài 3. Điểm hòa vốn sản xuất bồi đắp. Một chi tiết kim loại có hai phương án: gia công CNC với chi phí đồ gá 95 triệu đồng và chi phí biến đổi 320.000 đồng mỗi chi tiết; hoặc in kim loại với chi phí biến đổi 780.000 đồng mỗi chi tiết và không cần đồ gá.

- d) Tính sản lượng hòa vốn giữa hai phương án.
- e) Nhu cầu dự kiến năm đầu là 180 chi tiết, năm thứ hai chưa xác định. Bạn khuyến nghị phương án nào? Lập luận.
- f) Nếu thời gian chế tạo đồ gá là 5 tuần và khách hàng yêu cầu giao lô đầu trong 10 ngày, kết luận có thay đổi không?

Bài 4. Quyết định đầu tư ứng dụng cộng tác. Một công đoạn kiểm tra ngoại quan và đóng gói hiện dùng 3 công nhân mỗi ca, nhà máy chạy 2 ca. Chi phí lao động đầy đủ là 11 triệu đồng mỗi người mỗi tháng. Phương án đầu tư hệ thống thị giác máy kết hợp robot cộng tác có giá 1.450 triệu đồng; chi phí vận hành 90 triệu đồng mỗi năm; cần 1 vị trí giám sát toàn thời gian với chi phí 14 triệu đồng mỗi tháng. Vòng đời 5 năm, suất chiết khấu 12 phần trăm mỗi năm, hệ số hiện giá dòng tiền đều 5 năm là 3,6048.

- g) Tính chi phí lao động hiện tại, dòng tiền tiết kiệm ròng, thời gian hoàn vốn và giá trị hiện tại ròng.
- h) Xác định mức đầu tư tối đa để giá trị hiện tại ròng bằng 0.
- i) Hệ thống thị giác máy dự kiến giảm tỷ lệ hàng lỗi lọt ra khách hàng từ 1,2 phần trăm xuống 0,3 phần trăm; mỗi trường hợp khiếu nại gây thiệt hại trung bình 8 triệu đồng và sản lượng năm là 240.000 sản phẩm. Hãy bổ sung lợi ích này vào tính toán và nhận xét mức độ thay đổi của kết luận.
- j) Nêu hai rủi ro có thể khiến lợi ích ở câu c không hiện thực hóa.

Bài 5. Chẩn đoán thất bại tích hợp. Một nhà máy cơ khí triển khai MES trong 14 tháng. Hệ thống được nghiệm thu, nhưng sau 6 tháng vận hành, tổ trưởng vẫn ghi sản lượng vào sổ tay và nhập lại vào MES cuối ca. Báo cáo hiệu suất thiết bị toàn phần do MES sinh ra chênh lệch từ 8 đến 12 điểm phần trăm so với con số phòng sản xuất tự tính. Phòng công nghệ thông tin cho rằng do người dùng nhập liệu sai; phòng sản xuất cho rằng hệ thống tính sai.

- k) Xác định các dạng thất bại tích hợp đang hiện diện, dựa trên Bảng 2.7.
- l) Đề xuất trình tự năm bước khắc phục, sắp theo thứ tự ưu tiên và nêu rõ ai chịu trách nhiệm mỗi bước.
- m) Chỉ ra hai quyết định lẽ ra phải được đưa ra khác đi ở giai đoạn thiết kế dự án, đối chiếu với quy trình ở Hình 2.16.

Bài 6. Tinh gọn 4.0 và phân tích Pareto. Một chuyên lắp ráp có dữ liệu dừng chuyên trong một tuần như sau.

Bảng 2.24. Dữ liệu dừng chuyển trong một tuần

Nguyên nhân dừng	Số lần	Tổng thời gian (phút)
Chờ vật tư	42	315
Điều chỉnh máy	18	270
Hỏng thiết bị	4	240
Chờ kiểm tra chất lượng	26	156
Thiếu người	9	108

n) Lập phân tích Pareto theo tổng thời gian dừng và theo số lần dừng. Hai cách sắp xếp cho kết luận khác nhau ở điểm nào và vì sao điều đó quan trọng?

o) Với mỗi nguyên nhân trong ba nguyên nhân đứng đầu theo thời gian, hãy đề xuất một biện pháp tinh gọn không cần công nghệ và một biện pháp có công nghệ số.

p) Áp dụng trình tự năm bước ở Hình 2.17, hãy sắp xếp thứ tự triển khai các biện pháp đã đề xuất và lập luận.

Bài 7. An ninh mạng và dữ liệu. Nhà máy dự kiến kết nối 30 máy CNC lên nền tảng đám mây của nhà cung cấp thiết bị nước ngoài để sử dụng dịch vụ bảo trì dự báo, đồng thời lắp hệ thống chấm công bằng nhận diện khuôn mặt cho 600 lao động.

q) Áp dụng bảy nhóm yêu cầu nền tảng của IEC 62443 trong Bảng 2.20 để lập danh sách kiểm tra trước khi phê duyệt kết nối.

r) Vận dụng quy trình sáu bước ở Hình 2.19, hãy xác định các vùng an ninh cần thiết lập và mức an ninh mục tiêu cho từng vùng.

s) Nêu năm điều khoản cần đưa vào hợp đồng với nhà cung cấp về quyền sở hữu và quyền truy cập dữ liệu thiết bị.

t) Đối với hệ thống nhận diện khuôn mặt, xác định các nghĩa vụ phát sinh theo Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân và đề xuất phương án thay thế ít rủi ro hơn nếu nghĩa vụ tuân thủ quá nặng.

Bài 8. Thẩm định đề xuất công nghệ. Một nhà cung cấp chào bán giải pháp bản sao số cho dây chuyền sơn của nhà máy, giá trọn gói 2,8 tỷ đồng, cam kết giảm 15 phần trăm tiêu hao sơn. Hiện dây chuyền chưa có hệ thống thu thập dữ liệu tự động, dữ liệu tiêu hao sơn được ghi thủ công theo ca, và nhà cung cấp chỉ cho phép truy cập dữ liệu qua giao diện của họ.

u) Áp dụng quy trình sáu bước ở Hình 2.7 để thẩm định đề xuất này. Chỉ rõ đề xuất bị loại ở bước nào và vì sao.

v) Nếu ban giám đốc vẫn muốn theo đuổi mục tiêu giảm tiêu hao sơn, hãy đề xuất một lộ trình thay thế gồm ba giai đoạn với chi phí thấp hơn.

w) Xác định giải pháp mà nhà cung cấp chào bán thực chất thuộc mức nào trong ba mức của Bảng 2.9 và lập luận.

Bài 9. Bài tập nhóm, nối tiếp dự án Chương 1. Trên cơ sở nhà máy đã khảo sát ở Chương 1, hãy thực hiện các nội dung sau: xác định ba trụ cột công nghệ có tiềm năng tác động lớn nhất và lập luận bằng ma trận trụ cột và mục tiêu; định vị nhà máy trên lộ trình bốn giai đoạn ở Hình 2.21; đánh giá mức độ tích hợp hiện tại theo cả ba chiều; chỉ ra ít nhất hai dạng thất bại tích hợp có nguy cơ xảy ra; áp dụng quy trình sáu bước thẩm định cho đề xuất công nghệ ưu tiên số một; và lập ma trận kỹ năng hiện tại cùng kỹ năng mục tiêu cho một vị trí công việc chịu tác động trực tiếp. Trình bày trong không quá 6 trang, nêu rõ nguồn dữ liệu và các giả định đã sử dụng.



TÀI LIỆU THAM KHẢO

- acatech. (2020). *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the digital transformation of companies. Update 2020* (acatech STUDY). Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M., & Vogel-Heuser, B. (Eds.). (2014). *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer Vieweg.
- Budde, L., Hänggi, R., Friedli, T., & Rüedy, A. (2023). *Smart Factory Navigator: Identifying and implementing the most beneficial use cases for your company. 44 use cases that will drive your operational performance*. Springer Cham.
- Buer, S. V., Strandhagen, J. O., & Chan, F. T. S. (2018). The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, 56(8), tr. 2924 đến 2940.
- Deshpande, A., Sarkar, B., Dave, D., & Dave, R. (2024). *Advanced manufacturing and supply chain with IoT: Revolutionizing industries through smart technologies and connectivity*. BPB Publications.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, tr. 15 đến 26.
- Groover, M. P. (2020). *Automation, production systems, and computer integrated manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 62264: Enterprise control system integration*. IEC.
- International Electrotechnical Commission. (2018 đến 2020). *IEC 62443 series: Security for industrial automation and control systems*. IEC.
- International Organization for Standardization. (2010). *ISO 12100: Safety of machinery. General principles for design, risk assessment and risk reduction*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2025). *ISO 10218 phần 1 và phần 2, phiên bản 2025. Robotics: Safety requirements for industrial robots*. ISO.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. acatech.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC PapersOnLine*, 51(11), tr. 1016 đến 1022.
- Liker, J. K. (2021). *The Toyota Way* (2nd ed.). McGraw Hill.
- Manufacturing Enterprise Solutions Association. (n.d.). *MESA model and MES functionalities*. MESA International.
- Plattform Industrie 4.0. (2016). *DIN SPEC 91345: Reference Architecture Model Industrie 4.0*. DIN.

Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast Berglund, Å., & Gorecky, D. (2016). Towards an Operator 4.0 typology: A human centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. *Proceedings of CIE46*.

Shingo, S. (1986). *Zero quality control: Source inspection and the poka yoke system*. Productivity Press.

Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twins and cyber physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), tr. 653 đến 661.

Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of Industrie 4.0: An outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(1), 3159805.

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0: Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, tr. 530 đến 535.

Zhou, J., Li, P., Zhou, Y., Wang, B., Zang, J., & Meng, L. (2018). Toward new generation intelligent manufacturing. *Engineering*, 4(1), tr. 11 đến 20.

Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. (2015). *Luật An toàn thông tin mạng*.

Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. (2018). *Luật An ninh mạng*.

Quốc hội nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. (2025). *Luật Bảo vệ dữ liệu cá nhân*, Luật số 91/2025/QH15, có hiệu lực từ ngày 1 tháng 1 năm 2026.

