

Пределы полной автоматизации производства. Провал концепции Alien Dreadnought и системные основания гибридных производственных архитектур

Сухомлинов Владимир Владимирович

Независимый исследователь, индивидуальный предприниматель

105203, Россия, Москва, ул. 12-ая Парковая, д. 7, пом. 23

E-mail: 8vladimir8@gmail.com, v@8vladimir8.ru; тел.: +7-916-757-1781

В работе анализируется предпринятая компанией Tesla в 2016–2018 гг. попытка реализовать концепцию полностью автоматизированного производства Alien Dreadnought и последующий выход на лидирующие позиции компаний BYD и Hyundai Motor Group, применявших гибридные производственные архитектуры, восходящие к классической идеологии автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и социотехнического проектирования. Кризис выпуска Model 3 интерпретируется с позиций кибернетики Н. Винера, закона необходимого разнообразия У. Р. Эшби, концепции почти разложимых систем Г. Саймона, «ироний автоматизации» Л. Бейнбридж и теории «нормальных аварий» Ч. Перроу. Приводится количественная модель готовности последовательной линии, воспроизводящая наблюдавшийся масштаб падения производительности и показывающая эффект модульности с межоперационными заделами. Кейс дополнен сопоставимыми эпизодами (General Motors, Volkswagen, Foxconn, Adidas, Boeing, NUMMI, Siemens) и анализом кадрового измерения обеих стратегий. Эконометрическая проверка методом прерванного временного ряда датирует структурный сдвиг в выпуске Model 3 именно кварталом отказа от полной автоматизации (скачок уровня около +58% к контрфактическому тренду, $p \approx 0,01$). На данных о выпуске и качестве 2018–2025 гг. показано, что производители, сохранившие человека как контур адаптации и резервирования, обошли Tesla по объёму выпуска, темпам роста и качеству продукции. Сделан вывод о том, что в постиндустриальном укладе конкурентное преимущество определяется прежде всего архитектурой управления и организационным знанием, тогда как степень замещения живого труда вторична. Сюжет помещён в контекст мир-системного анализа и теории системных циклов накопления.

Ключевые слова: автоматизация производства; АСУТП; кибернетика; закон необходимого разнообразия; социотехнические системы; бережливое производство; Индустрия 5.0; Tesla; BYD; электромобили; мир-системный анализ; постиндустриальная экономика.

JEL Classification: L23, L62, M11, O33, P51.

1. Введение

Вторая половина 2010-х годов прошла в мировой промышленности под знаком ожиданий «безлюдного производства». Удешевление промышленных роботов, прогресс машинного зрения и риторика «Индустрии 4.0» сформировали убеждение, что полное вытеснение человека из производственного контура есть лишь вопрос инвестиций и времени. Наиболее радикальную версию этой программы попыталась реализовать компания Tesla, объявившая в 2016 г. о создании фабрики Alien Dreadnought, скорость линий которой исключала бы само присутствие людей. Попытка завершилась производственным кризисом 2017–2018 гг., поставившим компанию на грань банкротства, и публичным признанием И. Маска, что «чрезмерная автоматизация была ошибкой», а «люди недооценены» [The Guardian, 2018].

Настоящая работа рассматривает этот эпизод как редкий по чистоте естественный эксперимент над принципами теории управления. Одна отрасль, один период и сопоставимые ресурсы дали противоположные исходы. Радикальная автоматизация Tesla обернулась срывом планов и постепенной утратой лидерства, тогда как гибридные архитектуры BYD и Hyundai Motor Group обеспечили устойчивый рост выпуска и качества. По итогам 2025 г. BYD впервые обошла Tesla по годовым продажам чисто электрических автомобилей [CnEVPost, 2026], а Hyundai Motor Group закрепились в положении второго продавца электромобилей на рынке США [Cox Automotive, 2025].

Цель работы состоит в том, чтобы показать, что исход этого соревнования был предсказуем средствами теории, сложившейся задолго до нынешней волны цифровизации. Кибернетика Н. Винера (1948), социотехническая школа Тавистокского института (1951), закон необходимого разнообразия У. Р. Эшби (1956), концепция почти разложимых систем Г. Саймона (1962), теория жизнеспособных систем Ст. Бира (1972), анализ «ироний автоматизации» Л. Бейнбридж (1983) и теория «нормальных аварий» Ч. Перроу (1984) образуют согласованную систему аргументов, из которой ограничения полной автоматизации выводятся строго. Работа продолжает исследовательскую программу автора по

устойчивости многоукладных и многоконтурных хозяйственных систем [Сухомлинов, 2026а; Сухомлинов, 2026б] и переносит её логику на мезоуровень производственной системы предприятия.

2. Обзор литературы

Литература, на которую опирается работа, образует шесть потоков. Первый составляют классическая кибернетика и общая теория систем, заложившие принципы обратной связи, необходимого разнообразия и иерархической организации [Wiener, 1948; Ashby, 1956; Simon, 1962; Beer, 1972], включая отечественную линию от тектологии А. А. Богданова до школы В. М. Глушкова [Богданов, 1989; Глушков, 1982]. Второй поток образуют исследования человеческого фактора в автоматизации, от социотехнической школы [Trist, Bamforth, 1951] через «иронии автоматизации» [Bainbridge, 1983] и теорию нормальных аварий [Perrow, 1984] к инженерии устойчивости [Hollnagel, Woods, Leveson, 2006] и систематике распределения функций между человеком и автоматикой [Sheridan, 2002]. Третий поток составляет управление операциями, где ключевыми для настоящей работы являются закон буферизации вариабельности [Hopp, Spearman, 2008], эволюционная теория производственной системы Toyota [Ohno, 1988; Fujimoto, 1999] и полевые исследования гибридной организации труда на заводе NUMMI [Adler, 1993]. Четвёртый поток образуют отраслевые исследования автоматизации автопрома, документировавшие эпизоды 1980-х гг. у General Motors и Volkswagen [Keller, 1989; Jürgens, Malsch, Dohse, 1993; Womack, Jones, Roos, 1990]. Пятый поток образуют сравнительные исследования производственных культур и национальных моделей индустриализации [Hounshell, 1984; Dore, 1987; Amsden, 1989; Nonaka, Takeuchi, 1995; Hofstede, 2001]. Шестой поток задаёт макрорамку постиндустриального развития, технико-экономических парадигм и мир-системной динамики [Bell, 1973; Perez, 2002; Wallerstein, 1974; Arrighi, 2007; Rodrik, 2016]. Кризис Tesla документирован преимущественно деловой прессой и корпоративной отчётностью [Boudette, 2018; Tesla, 2018], а его систематическое осмысление в терминах перечисленных традиций фрагментарно. Настоящая работа восполняет этот пробел.

3. Концепция Alien Dreadnought и кризис Model 3

Летом 2016 г. на конференц-звонке по итогам второго квартала И. Маск представил инвесторам идею «машины, которая строит машину», пообещав, что к третьей версии фабрика будет «похожа на чужой дредноут». Ключевой тезис концепции сводился к тому, что человек должен быть удалён с линии, поскольку иначе конвейер «замедляется до скорости людей», тогда как автоматика способна работать на порядок быстрее. Под эту программу в ноябре 2016 г. была приобретена немецкая инжиниринговая компания Grohmann Engineering, а сборка Model 3 на заводе во Фримонте проектировалась с беспрецедентной для отрасли плотностью роботизации, включая попытку автоматизировать финальную сборку, которую даже наиболее роботизированные заводы мира традиционно оставляют людям. Символично, что сам завод во Фримонте достался Tesla в 2010 г. от совместного предприятия NUMMI компаний Toyota и General Motors, хрестоматийного примера эффективной социотехнической организации [Womack, Jones, Roos, 1990; Adler, 1993].

План предусматривал выход на 5000 Model 3 в неделю к концу 2017 г. Реальность оказалась иной. В третьем квартале 2017 г. было собрано 260 автомобилей, в четвёртом 2425, а скорректированная цель в 2500 машин в неделю к концу первого квартала 2018 г. была достигнута примерно на четыре пятых (около 2000 машин в последнюю неделю квартала). Совокупный выпуск первого квартала 2018 г. составил 9766 Model 3 [Tesla, 2018] при том, что линия проектировалась под многократно большие объёмы.

Анатомия сбоев хорошо документирована [Boudette, 2018]. Конвейер представлял собой жёстко синхронизированную цепь сотен роботизированных постов практически без межоперационных заделов. Машинное зрение не справлялось с естественной вариативностью деталей и допусков, которую опытный сборщик компенсирует машинально. Отказ одного поста останавливал линию целиком. Печальную известность получил робот, укладывавший звукоизоляционный мат на батарейный отсек (пресса окрестила его flufferbot) и так и не сумевший надёжно захватывать мягкий податливый объект, легко дающийся человеческой руке. Весной 2018 г. избыточно автоматизированный участок финальной сборки был частично демонтирован, операции возвращены людям, а в июне рядом с корпусом завода за несколько недель была возведена дополнительная линия

GA4 под тентом, спроектированная уже вокруг ручного труда с точечной механизацией. Именно эта «палаточная» линия позволила к концу июня 2018 г. достичь рубежа 5031 автомобиль в неделю.

Экономическая цена эксперимента была высока. Компания расходовала порядка миллиарда долларов за квартал и, по позднему признанию Маска, находилась примерно в месяце от банкротства. Тринадцатого апреля 2018 г. он публично подвёл итог. «Чрезмерная автоматизация в Tesla была ошибкой. Если быть точным, моей ошибкой. Люди недооценены» [The Guardian, 2018].

4. Теоретический анализ причин провала

4.1. Иерархия контуров управления. Классическая архитектура АСУТП, оформившаяся в 1970–1980-е гг. и кодифицированная в эталонной модели Пердью и стандарте ISA-95, строится как многоуровневая иерархия [Williams, 1994]. Нижний уровень образуют локальные контуры регулирования (датчик, контроллер, исполнительный механизм), выше располагаются контроллеры участков, системы диспетчеризации SCADA и лишь затем системы планирования производства и предприятия. Принципиально, что каждый уровень замыкает собственную петлю обратной связи и способен удерживать локальную цель автономно, даже при частичной потере связи с верхними уровнями. Поясним на бытовом примере. Комнатный термостат сам удерживает заданную температуру, и жильцу достаточно изредка менять уставку (желаемое значение). Теперь представим дом, где каждое включение обогревателя требует запроса к далёкому диспетчеру. Пока запрос идёт туда и обратно, комната успевает остыть или перегреться. Промышленная иерархия управления устроена по первому принципу. Быстрые и простые решения принимаются на месте автоматикой нижнего уровня, медленные и сложные – наверху, и каждый «этаж» получает лишь ту информацию, которая нужна его горизонту ответственности. Именно это Н. Винер считал общим устройством устойчивых систем управления в технике и живой природе [Wiener, 1948].

В отечественной традиции эта идеология развивалась школой В. М. Глушкова. Возглавляемый им Институт кибернетики АН УССР с начала 1960-х гг. создал одну из первых в мире серийных управляющих машин для промышленности («Днепр»), теорию автоматизированных систем управления разных уровней, от технологического процесса до отрасли, и проект общегосударственной системы обработки экономической информации (ОГАС). Существенно, что Глушков последовательно настаивал на человеко-машинном характере таких систем. Вычислительная техника готовит, проверяет и исполняет решения, тогда как целеполагание и ответственность остаются за людьми [Глушков, 1982].

Архитектура Tesla нарушала описанный принцип, тяготела к централизованной координации. Количественно разрыв выглядит так. Локальный контур регулирования промышленного контроллера замыкается за 1–100 миллисекунд, типовой цикл диспетчерского уровня занимает секунды, уровень планирования оперирует минутами и часами [Williams, 1994]. Обработка изображения системой машинного зрения, передача данных по сети, постановка задачи в очередь центрального планировщика и возврат команды исполнителю занимают в совокупности от сотен миллисекунд до секунд. Решение, которое штатная автоматика нижнего уровня приняла бы за миллисекунды, при централизованной архитектуре проходит цикл в сотни и тысячи раз дольше. Для конвейера с тактом порядка минуты, на котором возмущения возникают ежесекундно, такой регулятор систематически реагирует на уже ушедшую ситуацию.

4.2. Закон необходимого разнообразия. Согласно закону Эшби, регулятор способен удерживать существенные переменные системы в допустимых пределах лишь тогда, когда разнообразие его реакций не меньше разнообразия действующих возмущений [Ashby, 1956]. Реальный сборочный процесс порождает колоссальное разнообразие возмущений (геометрические отклонения деталей, дрейф оборудования, вариации материалов, логистические сбои), и промышленная практика столетие компенсировала его сочетанием стандартизации, допусков и человеческой адаптивности. Оператор в этой схеме выполняет роль универсального усилителя разнообразия, закрывающего «хвост» редких и непредвиденных ситуаций, под которые невозможно заранее написать программу.

Ст. Бир развернул этот закон в теорию жизнеспособных систем [Beer, 1972]. В его модели любая жизнеспособная организация содержит пять взаимосвязанных подсистем. Операционные единицы (система 1) ведут основную деятельность и обладают максимальной допустимой автономией, координация (система 2) гасит конфликты между ними, оперативное управление (система 3)

распределяет ресурсы и контролирует исполнение, разведка (система 4) отслеживает среду и будущее, политика (система 5) задаёт идентичность и правила выбора между настоящим и будущим. Требуемых два. Каждая операционная единица сама должна быть устроена как жизнеспособная система (принцип рекурсии), а каналы между уровнями должны пропускать необходимое разнообразие, для чего служат усилители и ослабители разнообразия. В терминах Бира производство Tesla представляло собой гипертрофированную систему 3, микроуправлявшую операциями при атрофированной автономии операционных единиц. Изъятие человека из линии без эквивалентной компенсации разнообразия со стороны автоматики означает прямое нарушение закона Эшби, и машинное обучение образца 2016–2018 гг. такой компенсации дать не могло.

4.3. Почти разложимые системы и буферы. Г. Саймон показал, что эволюционно устойчивые сложные системы почти всегда являются почти разложимыми. Они состоят из подсистем, внутренние связи которых существенно плотнее внешних, благодаря чему локальные сбои затухают внутри модуля [Simon, 1962]. Его притча о двух часовщиках, один из которых собирал часы из устойчивых промежуточных узлов, а второй из тысячи деталей за один приём, читается как прямое описание различия между модульной линией с заделами и линией Alien Dreadnought. Современная теория производственных систем формулирует ту же мысль в виде закона буферизации вариабельности. Вариабельность процесса неизбежно оплачивается некоторой комбинацией трёх буферов (запасов, резервов мощности и времени), и одновременное уничтожение всех трёх уничтожает пропускную способность [Норр, Spearman, 2008]. Линия Tesla была спроектирована именно так. Заделы стремились к нулю, плановая загрузка к единице, график к предельному уплотнению, поэтому вся вариабельность напрямую конвертировалась в простой.

4.4. Социотехника, иронии автоматизации и нормальные аварии. Социотехническая школа Тавистокского института ещё в 1951 г. показала, что производительность определяется совместной оптимизацией технической и социальной подсистем, а попытки оптимизировать первую в отрыве от второй разрушают обе [Trist, Bamforth, 1951]. Л. Бейнбридж дополнила эту линию анализом «ироний автоматизации». Чем совершеннее автоматика, тем более редкими, сложными и критичными становятся ситуации, требующие вмешательства человека, и тем хуже деградировавшие навыки оператора соответствуют этим ситуациям [Bainbridge, 1983]. Ч. Перроу выделил два свойства, сочетание которых делает аварии «нормальными», то есть статистически неизбежными. Это интерактивная сложность (нелинейные, плохо наблюдаемые взаимодействия компонентов) и жёсткая связанность (отсутствие временных и материальных зазоров между операциями) [Perrow, 1984]. Линия Alien Dreadnought максимизировала оба свойства одновременно. Родственный вывод формулирует инженерия устойчивости, определяющая надёжность как способность системы адаптироваться к неожиданному, причём носителем этой способности остаётся человек [Hollnagel, Woods, Leveson, 2006].

Возникает практический вопрос о том, какими характеристиками должна обладать вычислительная система, чтобы принять эту роль на себя. Ориентиры задаёт сам человек. Человеческая рука имеет более двадцати степеней свободы и тактильную чувствительность в доли миллиметра, сенсомоторная петля замыкается за 100–200 миллисекунд, освоение новой вариации операции происходит по единичным показам, а энергопотребление мозга составляет около 20 Вт. Промышленная робототехника 2020-х годов превосходит человека по скорости и повторяемости позиционирования (до сотых долей миллиметра), однако по «хвостовому» разнообразию, то есть доле нештатных ситуаций, разрешаемых без внешнего вмешательства, и по обучению из малого числа примеров уступает на порядки. В этом состоит парадокс Моравека. Сенсомоторные задачи, эволюционно древние и потому кажущиеся тривиальными, вычислительно тяжелее формального мышления [Moravec, 1988]. Отсюда следует измеримый критерий замены. Автономная система должна демонстрировать сопоставимые с человеческой бригадой долю самостоятельно разрешаемых нештатных ситуаций, время восстановления после сбоя и совокупную стоимость владения, и к середине 2020-х годов этот порог в массовой сборке не достигнут [Sheridan, 2002].

4.5. Урок бережливого производства. Философия Toyota, эталонная для отрасли, решала проблему автоматизации противоположным образом. Принцип дзидока предписывает наделять станки способностью останавливаться при отклонении, а право и обязанность остановить конвейер принадлежат любому рабочему (шнур андон, от яп. 行灯 андон, «бумажный фонарь», по сигнальной лампе, загорающейся над местом остановки). Человек встроен в систему как датчик, регулятор и

источник улучшений, автоматизация же вводится точно, там, где она устраняет тяжёлый, монотонный или опасный труд [Ohno, 1988; Womack, Jones, Roos, 1990]. Отвержение этой философии со стороны Tesla было вполне конкретным. Проект линии исключал рабочего как субъекта остановки и улучшения процесса (некому дёргать шнур андон, если людей на линии нет). Межоперационные заделы и выравнивание потока (хейдзунка) были принесены в жертву скорости такта. Отработанный отраслью порядок, при котором операция сначала стабилизируется в ручном исполнении, описывается стандартом и лишь затем передаётся автомату, был заменён автоматизацией «с чистого листа» до стабилизации самих операций. Наконец, культура непрерывных малых улучшений снизу уступила место культуре больших инженерных ставок сверху [Fujimoto, 1999; Adler, 1993].

5. Количественная иллюстрация и данные 2018–2025 гг.

Масштаб наблюдавшегося падения производительности согласуется с простейшей моделью надёжности последовательной линии. Пусть линия состоит из N последовательных автоматизированных постов, каждый из которых в каждый момент работоспособен с вероятностью a, а межоперационные заделы отсутствуют. Тогда готовность линии в целом равна произведению готовностей постов, $A = a^N$. При N = 1000 и весьма высокой поэлементной готовности a = 0,999 получаем $A \approx 0,37$, а при a = 0,9995 лишь $A \approx 0,61$. Даже почти идеальные компоненты, соединённые жёстко и без резервов, образуют линию, простаивающую большую часть времени, что количественно соответствует сообщавшимся оценкам загрузки автоматизированной линии Model 3 ниже 40% проектной мощности.

Теперь покажем эффект модульности. Разобьём ту же линию на k модулей по $n = N/k$ постов и разделим модули заделами, достаточными для поглощения типичных коротких остановок соседей. Тогда модули отказывают почти независимо, пропускную способность определяет узкое место, и готовность линии приближается к готовности одного модуля, $A \approx a^n$. При N = 1000 и a = 0,999 разбиение на k = 10 модулей даёт $A \approx 0,999^{100} \approx 0,90$, а разбиение на k = 20 модулей $A \approx 0,999^{50} \approx 0,95$ против 0,37 у линии без заделов. Платой служат несколько часов незавершённого производства в заделах, несопоставимые с потерями от простоя всей линии. Межоперационные буферы, объявленные в концепции Alien Dreadnought устаревшим наследием, представляют собой рассчитываемый инструмент управления вариабельностью [Hopp, Spearman, 2008].

Динамика выпуска подтверждает теоретический прогноз (табл. 1). После отказа от радикальной автоматизации Tesla быстро нарастила объёмы, однако темп её роста систематически уступал темпу BYD. Среднегодовой темп прироста продаж чисто электрических автомобилей (BEV) за 2020–2025 гг. составил у BYD около 77%, у Tesla около 27%. В 2024 г. компании практически сравнялись по годовому выпуску BEV, а в 2025 г. BYD впервые заняла первое место в мире (2 256 714 BEV против 1 636 129 у Tesla) при совокупных продажах свыше 4,5 млн машин с учётом подключаемых гибридов [CnEVPost, 2026; BYD, 2026].

Таблица 1. Продажи (поставки) электромобилей Tesla и BYD, шт.

Год	Tesla (BEV)	BYD (BEV)	BYD (NEV, всего)
2018	245 240	н/д	247 811
2019	367 500	н/д	229 506
2020	499 550	130 970	189 689
2021	936 172	320 810	603 783
2022	1 313 851	911 141	1 863 494
2023	1 808 581	1 574 822	3 024 417
2024	1 789 226	1 764 992	4 272 145
2025	1 636 129	2 256 714	4 550 036

Источники. Пресс-релизы Tesla, Inc. о производстве и поставках за 2018–2025 гг., биржевые уведомления BYD Co. Ltd. (HKEX), сводка [CnEVPost, 2026]. Для 2018–2019 гг. структура продаж BYD по типам силовой установки в сопоставимом виде недоступна (н/д).

Хроника кризиса допускает и прямую эконометрическую проверку. Сформулируем гипотезу H1. Если причиной срыва была архитектура полной автоматизации, то отказ от неё (демонтаж автоматизированной финальной сборки и запуск линии GA4 в конце второго квартала 2018 г.) должен

был вызвать статистически значимый структурный сдвиг в траектории выпуска, причём дата сдвига, найденная эндогенно, должна совпасть с датой деавтоматизации. Для проверки использован квартальный ряд производства Model 3 с третьего квартала 2017 г. по четвёртый квартал 2019 г. (десять наблюдений по официальным отчётам [Tesla, 2017–2020]), пересчитанный в средний недельный выпуск y_t . Оценена модель прерванного временного ряда $y_t = \alpha + \beta t + \gamma D_t + \delta(t - t^*)D_t + \varepsilon_t$, где t номер квартала, D_t индикатор режима после точки разрыва t^* . Перебор всех допустимых дат разрыва в духе тестов на неизвестную точку сдвига [Chow, 1960; Bai, Perron, 1998] даёт максимум F-статистики именно на третьем квартале 2018 г., первом полном квартале после деавтоматизации ($F(2,6) = 12,97$ против 4,46 и 2,63 у соседних кварталов, $p = 0,007$ по стандартному распределению).

Оценки параметров приведены в табл. 2. Скачок уровня составил $\gamma \approx 1498$ машин в неделю ($p = 0,011$), то есть около +58% к контрфактическому уровню в 2564 машины, экстраполированному по докризисному тренду, тогда как изменение наклона δ статистически незначимо ($p = 0,23$). Содержательно возврат человека на линию дал немедленный прирост уровня выпуска более чем наполовину при сохранении темпа дальнейшего наращивания, что согласуется с моделью готовности из начала раздела (устранение мультипликативной деградации действует как сдвиг уровня при неизменном темпе). Оговорки очевидны. Десять наблюдений дают лишь иллюстративную точность, критические значения при эндогенном выборе даты выше стандартных, а квартал разрыва не изолирует вклад отдельных одновременных мероприятий (демонтаж роботов, палаточная линия, отладка процессов). Тем не менее совпадение эндогенно найденной даты сдвига с датой отказа от полной автоматизации, знак и величина эффекта соответствуют H1 и плохо совместимы с альтернативой, в которой автоматизация нейтральна, а кризис объясняется лишь «болезнями роста».

Таблица 2. Оценки модели прерванного временного ряда для недельного выпуска Model 3

Параметр	Оценка	Ст. ошибка	t	p
α (константа)	–985,9	357,1	–2,76	0,033
β (тренд до разрыва)	710,0	130,4	5,45	0,002
γ (сдвиг уровня)	1498,1	414,8	3,61	0,011
δ (изменение наклона)	–196,8	147,8	–1,33	0,232

Примечание. Зависимая переменная средний недельный выпуск Model 3 по кварталам 2017Q3–2019Q4. $R^2 = 0,991$. Тест Чоу $F(2,6) = 12,97$ ($p = 0,007$). Точка разрыва 2018Q3 найдена перебором по максимуму F.

Качественные показатели указывают в ту же сторону. В исследовании начального качества J.D. Power 2023 г. автомобили Tesla показали 257 проблем на 100 машин при среднеотраслевом уровне 192 [J.D. Power, 2023]. Марки Hyundai Motor Group, напротив, в разные годы занимали верхние строки рейтингов начального качества J.D. Power, а по итогам 2024 г. заняла второе место на рынке электромобилей США со 124 065 проданными BEV, опередив General Motors [Cox Automotive, 2025]. Сопоставление траекторий требует оговорок. Успех BYD объясняется не только производственной архитектурой, но и вертикальной интеграцией в аккумуляторы, ёмкостью внутреннего рынка, промышленной политикой КНР и ценовой стратегией. Тем не менее производственная система выступает необходимым условием, без которого перечисленные факторы не конвертируются в физический выпуск.

6. Гибридные архитектуры азиатских производителей

BYD, основанная в 1995 г. как производитель аккумуляторов и вошедшая в автомобилестроение в 2003 г., наращивала автоматизацию эволюционно, от сварки и окраски к сборочным операциям, сохраняя за человеком контроль качества, переналадку и обработку нестандартных ситуаций. Компания сознательно удерживает гибридный характер линий, где роботизированные посты сочетаются с ручными участками, а трудоёмкая финальная сборка опирается на многочисленный обученный персонал. Вертикальная интеграция (собственные аккумуляторы Blade, силовая электроника, электромоторы, значительная часть компонентной базы) позволила проектировать производственные и управляющие системы как единое целое, со сквозными стандартами данных и локальными контурами управления на каждом переделе, что воспроизводит логику АСУТП на современной технологической базе.

Hyundai Motor Group опирается на полувековой опыт массового автомобилестроения и переносит в электромобильную эпоху отработанные принципы. Среди них модульность линий с буферными зонами, гибкие многомодельные конвейеры, коллаборативные роботы и предиктивное обслуживание оборудования. Открытый в 2023 г. инновационный центр HMGICS в Сингапуре демонстрирует следующую ступень. Вместо единого скоростного конвейера производство организовано ячейками, в каждой из которых человек и роботы совместно выполняют законченный набор операций, а цифровой двойник фабрики позволяет проверять изменения в виртуальной среде до их внедрения в цехе. Новые китайские производители (NIO, XPeng, Li Auto) проектировали заводы с умеренной автоматизацией и цифровыми двойниками, сохраняя людей на контроле качества и финальной сборке, и избежали кризисов масштабирования. Общим знаменателем является отношение к человеку как к архитектурному элементу системы управления. Люди заняты там, где максимально их преимущество (распознавание аномалий, адаптация, финальная сборка, улучшения), роботы там, где максимально их (повторяемость, скорость, тяжёлые операции), а пропорция смещается по мере созревания технологий плавно, без потери работоспособности.

7. Сопоставимые эпизоды в других странах и отраслях

Обе стратегии многократно воспроизводились в разных странах, и их результаты поддаются количественному сопоставлению. Начнём с радикальной автоматизации. General Motors в 1980-е гг. израсходовала на технологическое перевооружение, по разным оценкам, от 45 до 90 млрд долл., однако флагманский завод в Хамтрамке (2000 программируемых устройств, включая 260 роботов) годами работал в половину проектной мощности, современники описывали роботов, красивших друг друга вместо кузовов, а доля GM на рынке США за десятилетие снизилась примерно с 46 до 35% [Keller, 1989; Womack, Jones, Roos, 1990]. Volkswagen в 1983 г. открыл для Golf II «цех 54», публично пообещав автоматизировать около 25% сложных операций финальной сборки, однако столкнулся с ростом простоев и штата наладчиков и перешёл к тому, что немецкая литература назвала «скорректированной автоматизацией» [Jürgens, Malsch, Dohse, 1993]. Foxconn объявила в 2011 г. о намерении установить миллион роботов за три года [Reuters, 2011], к середине десятилетия располагала лишь десятками тысяч и вернулась к массовому найму. Adidas в 2016–2017 гг. открыла полностью роботизированные фабрики Speedfactory в Германии и США и уже в 2020 г. закрыла обе, вернув производство на азиатские площадки с ручной сборкой [Reuters, 2019]. Boeing в 2019 г. после четырёх лет проблем с качеством отказалась от роботизированной клёпки фюзеляжей 777 (проект FAUB) в пользу механизированного ручного труда [Gates, 2019].

Гибридная стратегия демонстрирует противоположную статистику. Завод NUMMI, укомплектованный теми же калифорнийскими рабочими, которые прежде считались худшим коллективом GM, за два года вышел на лучшие в концерне показатели качества при производительности, близкой к японским заводам Toyota, а прогулы сократились с примерно 20 до 3–4% [Adler, 1993]. Электронный завод Siemens в Амберге при глубокой, но иерархически организованной автоматизации с сохранением человека в контуре управления довёл уровень качества до 99,99885%, что соответствует примерно 11 дефектам на миллион при выпуске около 12 млн контроллеров в год [Siemens, 2018]. Показателен и противоположный полюс. «Безлюдные» цеха FANUC, где роботы месяцами собирают роботов без освещения, подтверждают закон Эшби от обратного. Полная автоматизация работоспособна там, где разнообразие продукта и процесса сведено к минимуму, и перестаёт работать по мере роста вариативности, максимальной именно в финальной сборке автомобиля.

8. Кадровое измерение и научные школы

Контраст стратегий имеет кадровую основу. Ядро управленческой команды Tesla формировалось из программной инженерии, аэрокосмической отрасли и потребительской электроники, а культура «первых принципов» поощряла пересмотр отраслевых норм. Носители традиционного производственного знания в компании появлялись (приобретение Grohmann Engineering, приглашение производственных руководителей из Audi и Toyota), однако высокая текучесть топ-менеджмента производственного блока в 2016–2018 гг. не позволила этому знанию закрепиться в архитектурных решениях.

Кадровый профиль азиатских лидеров противоположен. Основатель BYD Ван Чуаньфу по образованию специалист по физической химии металлургических процессов, работавший исследователем и заместителем директора в Пекинском научно-исследовательском институте цветных металлов, и компания с самого начала строилась как инженерная организация с десятками тысяч технологов. Её фирменный метод 1990-х гг. состоял в декомпозиции автоматизированных японских процессов производства аккумуляторов на операции, выполнимые обученными рабочими с точечной механизацией, что дало многократную экономию капитальных затрат и создало культуру осознанного выбора границы между человеком и машиной. Hyundai Motor Group опирается на корпоративную школу производственных инженеров с многолетними карьерами внутри концерна и на национальную систему инженерного образования. За обоими случаями стоит преемственность инженерных школ управления производством (японской, немецкой, а по ряду каналов и советской), тогда как проект Alien Dreadnought сознательно разрывал преемственность, трактуя накопленное отраслевое знание как балласт [Fujimoto, 1999].

9. Производственные культуры Америки и Восточной Азии

Кадровый контраст предыдущего раздела указывает на различие более глубокое, чем биографии отдельных руководителей. Речь идёт об устойчивых конфигурациях институтов, стимулов и профессиональных норм, которые в литературе принято называть производственными культурами. Оговорка здесь необходима сразу. Ниже описываются исторически сложившиеся и потому изменчивые организационные модели, а вовсе не свойства народов. Их носители мигрируют вместе с практиками, что подтверждается и успехом японской модели на американской почве в NUMMI [Adler, 1993], и неудачами азиатских компаний, копировавших американскую финансовую логику. Известные измерения национальных деловых культур [Hofstede, 2001] задают полезный фон, однако сами по себе исход не предсказывают, поскольку решающими оказываются институты фирмы и отраслевая история.

Американская модель выросла из «американской системы производства» XIX века с её культом взаимозаменяемых деталей, специализированного оборудования и радикального упрощения операций [Hounshell, 1984]. Научный менеджмент Ф. Тейлора закрепил разделение замысла и исполнения, при котором знание концентрируется в плановом отделе, а рабочему остаётся предписанный набор движений [Taylor, 1911]. Управленческая революция создала мощный слой профессиональных менеджеров, координирующих производство административными средствами [Chandler, 1977]. Сильные стороны этой конфигурации очевидны. Она даёт непревзойдённую способность к масштабированию, к организации массового выпуска нового продукта и к радикальным продуктовым инновациям. Слабости симметричны. Знание, изъятое у исполнителя, теряется в тех операциях, где оно принципиально неявно, а горизонт решений сокращается под давлением квартальной отчётности и приоритета акционерной стоимости, что описано как переход корпорации от логики «удерживать и реинвестировать» к логике «сокращать и распределять» [Lazonick, O'Sullivan, 2000]. Проект Alien Dreadnought в этом свете выглядит закономерным продуктом традиции. Он доводит тейлоровское разделение замысла и исполнения до предела, при котором исполнитель устраняется вовсе, и решает проблему координации инженерной ставкой сверху вместо накопления цехового опыта.

Восточноазиатская модель складывалась иначе. Японская школа выстроена вокруг работы с неявным знанием, которое невозможно полностью формализовать и которое передаётся через совместную практику, ротацию и малые группы улучшений [Nonaka, Takeuchi, 1995]. Долгосрочные отношения занятости и плотные связи с поставщиками снижают издержки координации и делают рациональным вложение в квалификацию, привязанную к конкретной фирме [Dore, 1987]. Производственная система эволюционирует здесь путём накопления способностей, тогда как разовый проект такой роли не играет [Fujimoto, 1999]. Корейская модель добавила к этому логику догоняющего развития, в которой освоение и улучшение заимствованных технологий поддерживалось государственной промышленной политикой и дисциплиной экспортных рынков [Amsden, 1989]. Китайская модель наследует азиатскую ориентацию на постепенное освоение и дополняет её собственными чертами. Среди них масштаб инженерного корпуса, позволяющий вести десятки параллельных итераций, вертикальная интеграция как ответ на несовершенство рынков компонентов, готовность декомпозировать дорогой автоматизированный процесс на операции для обученных рабочих и высокая скорость воспроизводства промышленных решений внутри плотных региональных кластеров.

Различие удобно свести к тому, где та или иная культура помещает знание о процессе. Американская традиция помещает его в проект и в информационную систему, восточноазиатская распределяет между цехом, инженерной службой и сетью поставщиков. Первая конфигурация выигрывает в скорости продуктовых прорывов, вторая в надёжности и качестве серийного выпуска, что М. Пиоре и Ч. Сейбл описывали как выбор между жёсткой специализацией и гибкой [Piore, Sabel, 1984]. Ни одна из них не является универсально лучшей. Существенно другое. Радикальная автоматизация требует именно того знания, которым сильна вторая конфигурация, поскольку автоматизировать можно лишь стабилизированную и понятую операцию. Проектировать безлюдную линию, не пройдя фазу цехового освоения процесса, значит формализовать то, что ещё не изучено. Оговорим и обратную сторону. Восточноазиатская модель имеет собственные издержки, включая переработки, жёсткость карьерных траекторий и склонность к инкрементальным улучшениям в ущерб радикальным ставкам, а её отдельные заимствования в США и Европе оказывались успешными. Тезис работы состоит поэтому в необходимости соответствия между типом задачи и типом организационного знания, которым располагает фирма, тогда как вопрос о превосходстве одной культуры над другой лишён смысла.

10. Постиндустриальный уклад и мир-системное измерение

В терминах постиндустриальной теории Д. Белла главным ресурсом развитых экономик становится теоретическое знание [Bell, 1973]. История Alien Drednought уточняет этот тезис. Критичным оказалось организационное знание о поведении сложных производственных систем, накопленное инженерной и управленческой традицией за полвека, тогда как алгоритмами и робототехникой компания располагала в избытке. Это согласуется с выводом К. Переса о том, что развёртывание технологической революции упирается прежде всего в организационные и институциональные инновации [Perez, 2002].

Мир-системная перспектива добавляет геоэкономическое измерение. Мир-системный анализ рассматривает капиталистическую мир-экономику как единую систему с осевым разделением труда [Wallerstein, 1974]. Ядро концентрирует капиталоемкие, технологически монополизированные и потому высокоприбыльные виды деятельности, периферия специализируется на конкурентных низкоприбыльных производствах, полупериферия занимает промежуточное положение и служит буфером системы. Принадлежность к зоне определяется местом деятельности страны в мировых цепочках стоимости, а сами зоны воспроизводятся через неэквивалентный обмен между ними. Массовое высококачественное производство исторически было монополией ядра и одним из главных механизмов присвоения мировой добавленной стоимости. Траектория Китая последних десятилетий описывается в этих терминах как восхождение из периферии через полупериферию к ядру, и автомобильная отрасль, где китайская компания стала мировым лидером по выпуску, а корейский концерн третьей силой, доводит этот сдвиг до логического завершения.

Дж. Арриги дополнил эту структурную картину теорией системных циклов накопления [Arrighi, 1994]. Каждый цикл организован вокруг гегемона (последовательно Генея, Голландия, Британия, США) и проходит две фазы. В фазе материальной экспансии капитал гегемона вкладывается в производство и торговлю, в фазе финансовой экспансии он покидает реальный сектор ради финансовых операций. Финансовая экспансия переживается современниками как процветание (рекордные капитализации, высокая доходность капитала), однако исторически она всякий раз оказывалась «осенью» гегемонии и подготавливала передачу лидерства следующему центру накопления, которым Арриги считал Восточную Азию [Arrighi, 2007].

Сопоставление Tesla и BYD воспроизводит эту макросхему в миниатюре. Капитализация Tesla кратно превосходит капитализацию BYD, отражая ожидания финансовых рынков старого ядра, тогда как по физическому выпуску, темпам роста и глубине производственной интеграции лидерство перешло к компании из восходящей зоны мир-системы. Симптоматично и то, что проект Alien Drednought финансировался с лёгкостью, характерной для фазы финансовой экспансии, когда рынок вознаграждает нарратив щедрее, чем производственную дисциплину. Д. Родрик показал, что преждевременная деиндустриализация лишает экономику важнейшего лифта производительности [Rodrik, 2016], и история Alien Drednought демонстрирует микроэкономический механизм той же угрозы. Организационная наука А. А. Богданова, предвосхитившая кибернетику, рассматривала устойчивость целого как функцию организованности связей между элементами [Богданов, 1989].

Провал Tesla был провалом связей (координации, обратных связей, буферов) при вполне работоспособных отдельных элементах.

11. Практические рекомендации

Из анализа следуют рекомендации, значимые далеко за пределами автомобилестроения, поскольку энтузиазм 2020-х годов вокруг «агентного» искусственного интеллекта воспроизводит установки 2016 г. на новом материале.

Для проектировщиков производственных и организационных систем. Автоматизацию следует наращивать эволюционно, удерживая систему работоспособной в каждой точке траектории, а крупные изменения проверять на цифровом двойнике до внедрения. Архитектура должна оставаться почти разложимой. Модули с локальными целями и контурами управления, заделы, рассчитанные по фактической вариабельности, и резервы мощности являются рассчитываемой платой за устойчивость. Человека необходимо проектировать в систему явно, с определёнными ролями (контроль аномалий, разрешение нештатных ситуаций, улучшение процессов) и с сохранением квалификации, для чего полезны ротация и регулярная ручная практика. Критерием успеха целесообразно считать пропускную способность, качество и устойчивость системы в целом, поскольку сокращение персонала как самоцель ведёт к решениям типа Alien Dreadnought.

Для корпоративного управления. Совету директоров и инвесторам следует различать технологический радикализм продукта и технологический радикализм процесса. Первый создаёт новые рынки, второй в зрелых отраслях с отработанными методологиями чаще уничтожает стоимость. Экспертиза в области производственных систем должна быть представлена на уровне стратегических решений, а сигналы с нижних уровней иерархии должны иметь институциональный канал, аналогичный шнуру андон.

Для промышленной политики. Опыт Восточной Азии показывает, что производственная компетенция является накапливаемым и утрачиваемым национальным активом. Политика, поощряющая сохранение инженерных школ АСУТП, подготовку техников и мехатроников, а также локализацию критических переделов, снижает риск преждевременной деиндустриализации. Для России, располагающей собственной традицией теории управления и наследием школы Глушкова, естественной стратегией выглядит специализация на гибридных человеко-машинных архитектурах и встраивание этих принципов в национальные стандарты цифровизации промышленности.

Отметим, что институциональный разворот в ту же сторону уже происходит. Риторика «Индустрии 4.0», сформированная германской правительственной инициативой 2011 г., в управленческом обиходе второй половины 2010-х годов нередко сводилась к идее «умной фабрики», из которой человек постепенно вытесняется сетью киберфизических систем. В 2021 г. Европейская комиссия предложила дополняющую рамку «Индустрии 5.0», построенную на трёх опорах. Это человекоцентричность, при которой благополучие, квалификация и расширение возможностей работника ставятся в центр производственной системы, устойчивость в экологическом смысле и резильентность, то есть способность промышленности выдерживать шоки и адаптироваться к ним [Brequé, De Nul, Petridis, 2021]. Существенно, что новая рамка мыслится как дополнение к прежней, отменять которую никто не предлагает, и переносит акцент с технологий на цели их применения [Xu et al., 2021]. Выводы настоящей работы совпадают с этой повесткой, но приходят к ней с другой стороны. Человекоцентричность обосновывается здесь не только этическими и социальными соображениями, но и требованиями закона необходимого разнообразия и теории надёжности, а резильентность получает конкретное инженерное содержание в виде модульности, межоперационных заделов и резервов мощности. Появление «Индустрии 5.0» спустя всего десятилетие после «Индустрии 4.0» можно прочесть как институциональное признание того, что радикальная версия безлюдного производства оказалась несостоятельной, и уроки Alien Dreadnought усвоены на уровне промышленной политики.

12. Заключение

Анализ позволяет сформулировать три вывода. Во-первых, провал концепции Alien Dreadnought был закономерным следствием одновременного нарушения нескольких независимо установленных принципов теории управления (иерархии быстрых локальных контуров, закона необходимого

разнообразия, почти разложимой архитектуры и буферизации вариабельности), причём простейшая модель надёжности последовательной линии количественно воспроизводит и наблюдавшийся масштаб деградации, и эффект восстановления при модульности с заделами, а эконометрическая датировка структурного сдвига в выпуске Model 3 совпадает с кварталом деавтоматизации. Сопоставимые эпизоды у General Motors, Volkswagen, Foxconn, Adidas и Boeing показывают, что случай Tesla типичен. Во-вторых, победившие архитектуры BYD и Hyundai Motor Group представляют собой современное развитие классической идеологии АСУТП и социотехнического проектирования, в котором автоматика и человек образуют взаимодополняющие контуры, а темп автоматизации подчинён требованию сохранения работоспособности системы. Данные 2018–2025 гг. о выпуске и качестве, как и кадровая генеалогия компаний, подтверждают преимущество этой стратегии, а сопоставление производственных культур объясняет её происхождение через различие в том, где организация хранит знание о процессе. В-третьих, в постиндустриальном укладе решающим фактором конкуренции оказываются архитектура управления и организационное знание, а мир-системным следствием их недооценки старым ядром становится перемещение производственного лидерства в Восточную Азию. Показательно, что европейская рамка «Индустрии 5.0» с её опорами на человекоцентричность и резильентность закрепляет этот вывод на уровне промышленной политики. Уроки эпизода прямо относятся и к текущей волне внедрения искусственного интеллекта. Системы, игнорирующие полувековую теорию надёжности и разнообразия, будут воспроизводить кризис Model 3 в новых отраслях.

Литература

- Богданов А.А. Тектология. Всеобщая организационная наука: в 2 кн. М.: Экономика, 1989.
- Глушков В.М. Основы безбумажной информатики. М.: Наука, 1982. 552 с.
- Сухомлинов В.В. Имитационная модель устойчивости многоукладной экономики. Zenodo, 2026a. DOI: 10.5281/zenodo.21382694.
- Сухомлинов В.В. Двухконтурная экономика: философско-исторические основания, теоретические модели и отличие от системы кредитных денег. Препринт. Zenodo, 2026b. DOI: 10.5281/zenodo.21490097.
- Adler P.S. The “Learning Bureaucracy”: New United Motor Manufacturing, Inc. // *Research in Organizational Behavior*. 1993. Vol. 15. P. 111–194.
- Amsden A.H. *Asia’s Next Giant: South Korea and Late Industrialization*. New York: Oxford University Press, 1989. 379 p.
- Arrighi G. *The Long Twentieth Century: Money, Power, and the Origins of Our Times*. London: Verso, 1994. 400 p.
- Arrighi G. *Adam Smith in Beijing: Lineages of the Twenty-First Century*. London: Verso, 2007. 420 p.
- Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall, 1956. 295 p.
- Bai J., Perron P. Estimating and Testing Linear Models with Multiple Structural Changes // *Econometrica*. 1998. Vol. 66, no. 1. P. 47–78.
- Bainbridge L. Ironies of Automation // *Automatica*. 1983. Vol. 19, no. 6. P. 775–779.
- Beer S. *Brain of the Firm*. London: Allen Lane, 1972. 319 p.
- Bell D. *The Coming of Post-Industrial Society: A Venture in Social Forecasting*. New York: Basic Books, 1973. 507 p.
- Boudette N.E. Inside Tesla’s Audacious Push to Reinvent the Way Cars Are Made // *The New York Times*. 2018. June 30.
- Breque M., De Nul L., Petridis A. *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. 48 p.
- BYD Co. Ltd. Production and Sales Volume Announcement for December 2025. HKEX Filing, 2026.
- Chandler A.D. *The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business*. Cambridge, MA: Belknap Press, 1977. 608 p.
- Chow G.C. Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions // *Econometrica*. 1960. Vol. 28, no. 3. P. 591–605.
- CnEVPost. Tesla Loses BEV Crown to BYD in 2025 as Global Deliveries Drop 15.61% in Q4. 2026. URL: <https://cnevpost.com/2026/01/02/tesla-q4-2025-global-deliveries/>.
- Cox Automotive. Kelley Blue Book Electrified Vehicle Sales Report, Q4 2024. Atlanta, 2025.
- Dore R. *Taking Japan Seriously: A Confucian Perspective on Leading Economic Issues*. Stanford: Stanford University Press, 1987. 264 p.
- Fujimoto T. *The Evolution of a Manufacturing System at Toyota*. New York: Oxford University Press, 1999. 380 p.
- Gates D. Boeing Abandons Its Failed Fuselage Robots on the 777 // *The Seattle Times*. 2019. November 14.
- Hofstede G. *Culture’s Consequences: Comparing Values, Behaviors, Institutions and Organizations Across Nations*. 2nd ed. Thousand Oaks: Sage, 2001. 596 p.

- Hollnagel E., Woods D.D., Leveson N. (eds.) *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Aldershot: Ashgate, 2006. 397 p.
- Hopp W.J., Spearman M.L. *Factory Physics*. 3rd ed. Long Grove: Waveland Press, 2008. 720 p.
- Hounshell D.A. *From the American System to Mass Production, 1800–1932*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1984. 411 p.
- J.D. Power. 2023 U.S. Initial Quality Study (IQS). Troy, MI, 2023. URL: <https://www.jdpower.com/business/press-releases/2023-us-initial-quality-study-iqs>.
- Jürgens U., Malsch T., Dohse K. *Breaking from Taylorism: Changing Forms of Work in the Automobile Industry*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 493 p.
- Keller M. *Rude Awakening: The Rise, Fall, and Struggle for Recovery of General Motors*. New York: William Morrow, 1989. 304 p.
- Lazonick W., O’Sullivan M. *Maximizing Shareholder Value: A New Ideology for Corporate Governance // Economy and Society*. 2000. Vol. 29, no. 1. P. 13–35.
- Moravec H. *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988. 214 p.
- Nonaka I., Takeuchi H. *The Knowledge-Creating Company*. New York: Oxford University Press, 1995. 284 p.
- Ohno T. *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Portland: Productivity Press, 1988. 143 p.
- Perez C. *Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages*. Cheltenham: Edward Elgar, 2002. 198 p.
- Perrow C. *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. New York: Basic Books, 1984. 386 p.
- Piore M.J., Sabel C.F. *The Second Industrial Divide: Possibilities for Prosperity*. New York: Basic Books, 1984. 355 p.
- Reuters. Foxconn to Rely More on Robots, Could Use 1 Million in 3 Years. 2011. August 1.
- Reuters. Adidas to Close German and U.S. Robot Factories. 2019. November 11.
- Rodrik D. *Premature Deindustrialization // Journal of Economic Growth*. 2016. Vol. 21, no. 1. P. 1–33.
- Sheridan T.B. *Humans and Automation: System Design and Research Issues*. New York: Wiley, 2002. 264 p.
- Siemens AG. *The Amberg Electronics Plant: Digital Enterprise in Practice*. Press materials. Munich, 2018.
- Simon H.A. *The Architecture of Complexity // Proceedings of the American Philosophical Society*. 1962. Vol. 106, no. 6. P. 467–482.
- Taylor F.W. *The Principles of Scientific Management*. New York: Harper & Brothers, 1911. 144 p.
- Tesla, Inc. Q1 2018 Vehicle Production and Deliveries. Palo Alto, 2018.
- Tesla, Inc. Vehicle Production and Deliveries Reports, Q3 2017 – Q4 2019. Palo Alto, 2017–2020.
- The Guardian. Elon Musk Drafts in Humans after Robots Slow down Tesla Model 3 Production. 2018. April 16. URL: <https://www.theguardian.com/technology/2018/apr/16/elon-musk-humans-robots-tesla-model-3>.
- Trist E.L., Bamforth K.W. *Some Social and Psychological Consequences of the Longwall Method of Coal-Getting // Human Relations*. 1951. Vol. 4, no. 1. P. 3–38.
- Wallerstein I. *The Modern World-System*. Vol. I. New York: Academic Press, 1974. 410 p.
- Wiener N. *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge, MA: MIT Press, 1948. 194 p.
- Williams T.J. *The Purdue Enterprise Reference Architecture // Computers in Industry*. 1994. Vol. 24, no. 2–3. P. 141–158.
- Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L. *Industry 4.0 and Industry 5.0. Inception, Conception and Perception // Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 61. P. 530–535.
- Womack J.P., Jones D.T., Roos D. *The Machine That Changed the World*. New York: Rawson Associates, 1990. 323 p.

The Limits of Full Production Automation. The Failure of the Alien Dreadnought Concept and the Systemic Foundations of Hybrid Manufacturing Architectures

Vladimir V. Sukhomlinov

Independent researcher, individual entrepreneur
105203, Russia, Moscow, 12th Parkovaya St., 7, room 23
E-mail: 8vladimir8@gmail.com, v@8vladimir8.ru

The paper analyses Tesla’s 2016–2018 attempt to implement the fully automated Alien Dreadnought manufacturing concept and the subsequent rise of BYD and Hyundai Motor Group, whose hybrid production architectures build on the classical ideology of hierarchical industrial process control systems and sociotechnical design. The Model 3 production crisis is interpreted through Wiener’s cybernetics, Ashby’s law of requisite variety, Beer’s viable system model, Simon’s near-decomposability, Bainbridge’s ironies of automation and Perrow’s normal accident theory. A simple availability model of a serial line quantitatively reproduces both the observed collapse of throughput on the unbuffered line and its recovery under modular decomposition with buffers. An interrupted time-series estimate dates the structural break in Model 3 output exactly at the quarter when full automation was abandoned, with a level jump of about 58 percent relative

to the pre-crisis trend ($p \approx 0.01$). The case is complemented by comparable episodes (General Motors, Volkswagen, Foxconn, Adidas, Boeing, NUMMI, Siemens Amberg) by an analysis of the engineering cadres behind both strategies, and by a comparison of American and East Asian manufacturing cultures. Production and quality data for 2018–2025 show that manufacturers who retained the human operator as a layer of adaptation and redundancy overtook Tesla in output, growth and quality. The case is placed within world-systems analysis and Arrighi's theory of systemic cycles of accumulation. The key conclusion is that in the post-industrial order competitive advantage is determined primarily by the architecture of control and organizational knowledge rather than by the degree of labour displacement.

Key words: manufacturing automation; industrial process control; cybernetics; law of requisite variety; sociotechnical systems; lean production; Industry 5.0; Tesla; BYD; electric vehicles; world-systems analysis; post-industrial economy.

JEL Classification: L23, L62, M11, O33, P51.