

Теория производства

Эффективные производственные процессы строятся на основе фундаментальных законов физики предприятия.

Фредрик Нордстрем, Пиотр Гавад, Адам Новарски

Человек занимался «производством» с тех пор, как сделал первые шаги по земле. Безусловно, с тех пор методы производства значительно видоизменились и продолжают развиваться. Регулярно появляются новые концепции и модные термины, которые кажутся решением всех без исключения проблем руководителя производства, но впоследствии на их место приходят новые концепции и еще более громкие слова.

И хотя в большинстве из них есть определенная доля истины, наиболее важным остается глубокое знание руководителем фундаментальных законов, определяющих течение процессов производства, которое позволяет применять подходящий инструментарий и концепции в правильном, сбалансированном сочетании. Иными словами, существует необходимость в понимании «теории производства».

Что подразумевается под «теорией производства»? Вкратце можно сказать, что это сочетание обозначает фундаментальные законы отдельно взятого производственного процесса – не только подробное техническое описание, но и законы взаимодействия элементов производственной линии как системы. Древние египтяне, к примеру, обладали навыками применения законов физики при постройке пирамид. Однако, поскольку вопросы массового производства – а следовательно, и скорости – в то время уж точно не стояли, египтянам не приходилось сталкиваться с проблемами организации материальных и товарных потоков, которые возникают, если речь идет о массовом производстве товаров или осуществлении непрерывных процессов. Чтобы перейти к рассмотрению этих проблем, нам надо рассмотреть первую промышленную революцию.

До середины XVIII века товары производились по одному искусным ремесленником. Затем появление нескольких изобретений повлекло за собой событие, названное промышленной революцией, когда повсеместная механизация производственных систем привела к переходу от изготовления товаров вручную на дому к организации крупного фабричного производства. Наиболее важным из этих изобретений было создание парового двигателя Джеймсом Уаттом. Использование энергии пара позволило не только размещать производство без учета ограничений, связанных с доступностью энергии падающей воды, но и привело к снижению стоимости энергии – а значит, снижению производственных издержек и цен на товары.

Другое изобретение было сделано на рубеже веков (1799-1801) оружейным мастером Эли Уитни. Он первым использовал принцип взаимозаменяемых деталей, что позволило собирать и ремонтировать изделия в краткие сроки, не полагаясь исключительно на мастерство отдельных талантливых рабочих. Единообразия деталей также достигалось за счет применения станков с необходимой оснасткой, изготовлявших отдельные детали ружья. Очевидно, что основы концепции сборочных линий зародились в самом начале XIX века.

Среди других важных новшеств того времени были инновации в транспорте (железные дороги) и связи (телеграф), которые послужили необходимыми механизмами распределения товаров и информации.

Современное интегрированное промышленное предприятие начало оформляться в ходе так называемой второй промышленной революции. Теперь всё необходимое для массового производства и распределения продукции было в наличии.

Формирование массового производства

Есть человек, чье имя всегда будут связывать с началом массового производства стандартизованных товаров с использованием специализированного оборудования и подвижной сборочной линии. Этот человек – Генри Форд. Подвижная сборочная линия была запущена на его автомобильном заводе в 1913 году. Создание конвейеров позволило избежать лишних операций и затрат времени при перемещении узлов и деталей между производственными участками. Форд воплотил в жизнь идеи Фредерика У. Тейлора, высказанные им в книге «Принципы научного управления» (The Principles of Scientific Management) в 1911 году – он создал непрерывный поток путем «перемещения работы к человеку» вместо «перемещения человека к работе». Фактически, это и было моментом рождения концепции рационального производства (lean production), одним из важнейших принципов которой является устранение отходов и непроизводительных потерь. Позднее подход был воспроизведен и усовершенствован Таичи Оно с командой единомышленников в фирме Toyota.

Под «теорией производства» понимают фундаментальные законы отдельно взятого производственного процесса – не только подробное описание элементов, но и законы взаимодействия элементов производственной линии как системы.

В ретроспективе, однако, можно заметить, что факт появления конвейера как такового оказался в некоторой тени от того, что Форд огромное значение придавал стратегически важному параметру – скорости. Он видел, что быстрое осуществление процесса оказывает положительное влияние на объем выпуска продукции и товарные запасы, а следовательно, дает ему возможность работать с более низкими издержками, чем у конкурентов.

Выявление природы разнообразия

В то время как Генри Форд в попытке обеспечить максимальную скорость производства и снизить общие издержки сократил разнообразие продукции до абсолютного минимума (завод производил только черные автомобили), оставались и приверженцы другого подхода, направившие усилия на «отладку» процесса с целью повышения надежности изделий. Например, инженеры в Лабораториях Белла компании Western Electric экспериментировали с различными регуляторами производственного процесса в попытке повысить качество передающих систем, впрочем, без заметных результатов. Статистик Уолтер А. Шухарт в итоге сделал вывод, что всякие регуляторы процесса, направленные на подавление колебаний, находящихся на уровне случайного отклонения, только увеличивают разброс параметров процесса, а следовательно, снижают эффективность. Иными словами, работа на основе интуиции и наилучших намерений (или метода проб и ошибок) схожа с плаванием по неизвестным водам без компаса и карты. Результаты его работ легли в основу методов статистического контроля процессов (SPC, statistical process control) ¹⁾ в дальнейшем видоизмененных и проработанных двумя бывшими сотрудниками

Сборка генератора в Бадене, Швейцария, 1895 г.



Тенденции в производстве

Western Electric – д-ром У. Эдвардом Демингом и д-ром Джозефом М. Джураном.

Работа Шухарта, опубликованная в 1931 году под названием «Экономическое управление качеством продукции», оказалась важным научным вкладом в развитие самой дисциплины промышленного производства.

Современные инструменты управления качеством, такие как Six Sigma (вставка 1), построены с непосредственным использованием результатов этой работы.

Редукционизм и системный подход

В своих попытках разработать методы уп-

равления производством Фредерик У. Тейлор разделял производственную систему на отдельные простые части с целью усовершенствования и достижения максимальной эффективности каждой из этих частей (редукционистский подход). Он создал оснастку, крепление и другие приспособления, позволяющие добиться стандартизации лучших методов работы, чем заслужил звание «отца промышленной технологии».

Такой редукционистский подход превосходно работает при анализе отдельных операций, из которых складывается изготовление детали или узла. Однако повышение общей эффективности процесса не должно сводиться к совершенствованию

каждого отдельного элемента процесса, наоборот, при этом следует особое внимание уделять взаимодействию компонентов друг с другом и другими подсистемами, в совокупности осуществляющими производственный процесс. Оптимизация работы обеспечивается при этом с применением общесистемных критериев.

В производственной системе, как и в большинстве реальных систем, представлены зависимые события и вариации. Поскольку все компоненты взаимосвязаны, то для нахождения лучших путей повышения эффективности необходимо обратиться к системному подходу. Это важнейший вывод, который был сделан одними из величайших мыслителей XX века, в число которых входят

Управление вариациями – взгляд с точки зрения качества

В современном производственном процессе зачастую используются сложные технологии контроля производительности и качества. Эти технологии играют важнейшую роль, особенно в условиях, когда менеджеры и компании-операторы стремятся к постоянному улучшению показателей процесса.

Для организации эффективного процесса, продуктом которого являются изделия высочайшего качества, необходимо осуществлять управление множеством различных параметров. Соответственно, существует необходимость в современных подходах и средствах, таких как Six Sigma, методы планирования эксперимента (DOE) и SPC¹.

Six Sigma – одна из методологий, заслужившая очень хорошую репутацию. Это тщательно структурированная и основанная на информационных технологиях методология устранения дефектов в любых процессах. Для достижения уровня «six sigma» процесс должен выдавать не более 3,4 дефектов на один миллион возможностей.

Для обеспечения полного представления о процессах и достижения непрерывного улучшения при реализации методов Six Sigma возникает необходимость в сборе, отображении и анализе данных процесса.

Статистическое представление по методу Six Sigma количественно характеризует ход процесса. Используемые статистические средства и средства решения задач подобны средствам из других современных стратегий повышения качества. Однако в Six Sigma особая

роль отводится методичному, систематическому применению этих средств, что позволяет достичь весомых улучшений, проявляющихся в заметном и количественно измеримом улучшении итоговых показателей.

Стратегия Six Sigma, построенная на измерениях, направлена на улучшение процессов путем выполнения «проектов улучшения». На практике это осуществляется с помощью базовой для Six Sigma схемы действий – DMAIC. Схема DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control – Определение, Измерение, Анализ, Улучшение, Управление) – это схема совершенствования работающих процессов, не соответствующих предъявляемым требованиям и нуждающихся в постепенном улучшении.

Для достижения заявленных целей в Six Sigma применяется широкий ряд статистических средств. Однако именно применение методов SPC – и связанных с ними графиков регулирования (рис. 1) – является основным инструментом анализа вариаций в процессе.

SPC – это метод построения графика процесса и быстрого распознавания «выхода процесса из под контроля» (например, наличия вариаций, обусловленных специальной причиной). Далее процесс подвергается изучению с помощью одного или нескольких средств усовершенствования процессов (метод Парето, планирование эксперимента, причинно-следственные схемы [C&E, Cause and Effect Diagram], анализ характера и последствий отказов [FMEA, Failure Mode and Effect Analysis]) с выявлением основной причины выхода из-под контроля. После того как основная причина определена, происходит поиск стра-

тегии коррекции. Эффективность изменений может быть проверена с помощью методов SPC (рис. 2).

Можно выделить две составляющих вариаций: естественные вариации процесса, часто называемые вариациями, обусловленными общей причиной, или системными вариациями (естественным образом возникающие колебания; разброс, присущий всем процессам), и вариации, обусловленные специальной причиной (обычно специфической проблемой или нештатной ситуацией в системе).

Методология Six Sigma находит широкое применение в дискретном производстве и производствах с непрерывным технологическим процессом. В компании АББ уже используются преимущества методов Six Sigma и SPC, позволившие добиться значительных результатов в области качества и роста прибыли.

Исследовательскими подразделениями компании была разработана система SPC, адаптированная для контроля и анализа процессов дискретного производства. Проверенные методы были модернизированы, в результате чего упростилось внедрение и повысилась эффективность поддержки при принятии решений. В настоящее время ведется развертывание системы совместно с системой организации производства (MES, manufacturing execution system). Работа подкреплена недавно запущенной инициативой в рамках программы «превосходной работы», которая направлена на расширение использования систем SPC в процессах дискретного производства.

Тенденции в производстве

У. Эдвардс Деминг, Джей Форрестер, Петер Зенге и Эли Голдратт.

Хорошим примером системы с переменными и зависимыми событиями может послужить шоссе в час пик. Перемещение автомобиля по шоссе – это событие, зависящее от перемещения других автомобилей. Переменные здесь – время реакции, навыки водителя, характеристики конкретной машины, состояние шин и погодные условия. Увеличение числа автомобилей в какой-то момент приведет к образованию затора, за счет чего скорость потока упадет. Кроме того, проявляется «эффект резиновой ленты», который усиливается вдоль образовавшейся очереди автомобилей. Водители вынуждены постоянно подстраиваться под хаотичное движение других машин в потоке.

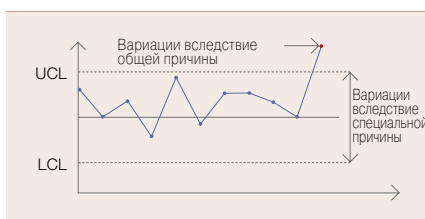
Тот же эффект можно наблюдать и на производственных линиях. При одновременном наличии в работе слишком большого числа деталей движение потока прерывается, а результатом оказывается очень низкая общая производительность. Здесь сталкиваются редукционизм и системный подход. При стремлении обеспечить высокую локальную эффективность каждого отдельного подпроцесса необходимо передавать на обработку заготовки в количестве, превосходящем оптимальное, определенное по критерию общей скорости потока. Результатом окажется образование излишков незавершенной продукции (WIP, Work-In-Progress), увеличение общего времени производственного цикла и рост издержек, не говоря уже о снижении общей производительности. Это еще один пример того, как интуиция и наилучшие намерения без глубокого знания фундаментальных взаимосвязей могут привести к возникновению проблем.

Наиболее сильный «эффект резиновой ленты» обычно наблюдается в длинных логистических цепочках и его чаще называют «эффектом кнута». Увеличение задержек в передаче информации и материалов приводит к колебаниям запасов и непостоянству наличия материалов. По всей видимости, ключом к управлению производством служит понимание природы колебаний и их влияния на общую систему производства и поставок.

Управление вариациями – взгляд с точки зрения организации потока

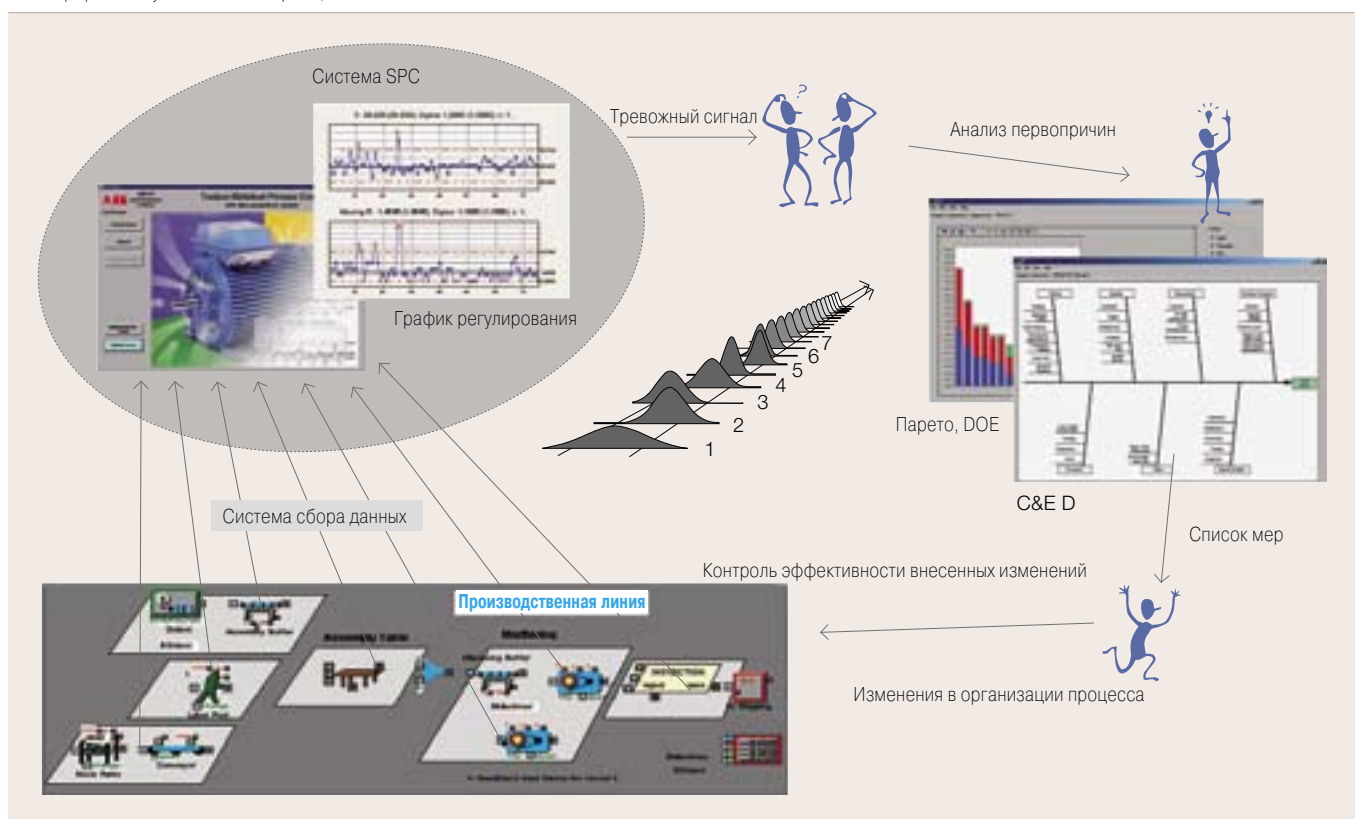
Один из фундаментальных законов производства гласит, что увеличение разнообразия продукции всегда понижает производительность системы. Это значит, что при сокращении разнообразия становится проще управление производственным процессом и его совершенствование. Генри Форд и разработчики знаменитой производственной системы Toyota, безусловно, рассуждали именно так. Однако, судя по всему, они не учли того, что эффективность систем с высокой степенью вариаций потенциально может быть повышена, если будут найдены действенные способы контроля таких вариаций.

1 График регулирования – вариации, обусловленные общей и специальной причинами



Ключом к управлению производством служит понимание природы колебаний и их влияния на общую систему производства и поставок.

2 Непрерывное уменьшение вариаций – базовая схема SPC



Тенденции в производстве

Управление вариациями – общие понятия

Лишь к концу XX века в промышленности началось полномасштабное использование принципа производства широкого ассортимента изделий из набора стандартизованных элементов. Таким образом, имеется два подхода к организации производства – либо сокращение вариаций, либо управление ими (рис. 3). Компания АББ разработала обобщенную методологию производства в соответствии со спросом – «тянущего производства» – CP3 (Common Pull Production Practices)¹⁾, позволяющую реализовать оба подхода одновременно. Методология CP3 охватывает способы управления производством, организацию материальных потоков и потоков информации на предприятии и методы интеграции процессов поставщиков в деятельность предприятия. Методология построена на основе концепции рационального производства (Lean Manufacturing)¹⁾ и теории ограничений (TOC, Theory of Constraints)¹⁾.

При производстве в соответствии со спросом («тянущем производстве») темп производства

задается заказами потребителей, в противоположность системе, в которой детали или узлы производятся по предварительно разработанному графику. За счет этого процесс производства приводится в более полное соответствие потребностям.

Важнейшую роль в концепции CP3 играет реализация «тянущего производства» с управлением объемом незавершенной продукции (WIP), основанном на еще одном фундаментальном соотношении – законе Литтла (вставка 2):

$WIP^1) = \text{производительность (PR)}^1) \times \text{время производственного цикла (TPT)}^1)$

Есть множество других законов или соотношений, определяющих ход производства, многие из которых (см. табл. 1)²⁾ связаны с упомянутыми выше. Понимание этих фундаментальных законов физики предприятия совершенно необходимо для эффективного управления производством.

В начале XX века электрические двигатели начали вытеснять паровые машины с позиций основного источника энергии для механизмов. Одно-, двух- и трехфазные двигатели переменного тока, выпускаемые фирмой ВВС, сыграли в этом немаловажную роль.



Закон Литтла

Закон Литтла гласит, что для любой данной производительности среднее время производственного цикла прямо пропорционально количеству незавершенной продукции, находящейся в обработке. У данного утверждения есть несколько важных следствий.

- Во-первых, если увеличивается время производственного цикла, требуется больший объем незавершенной продукции для обеспечения того же темпа выхода готовой продукции. Очевидно, что время ожидания в очереди, добавляемое в системах ERP¹⁾ для компенсации суточной нестабильности длины цикла, является одной из основных причин избыточного количества незавершенной продукции на многих предприятиях.
- Во-вторых, из закона следует, что скорость обработки может быть обеспечена за счет ограничения числа нарядов, поступающих в цех. Простым ограничением WIP можно значительно повысить скорость движения потока.

Закон Литтла можно рассматривать как «закон Ома для производства»:

Если $R = \frac{V}{I}$, то $TPT = \frac{WIP}{PR}$ где:

- TPT соответствует сопротивлению – времени, необходимому одному изделию для прохождения через производственную линию.
- WIP соответствует потенциалу, объему продукции в системе, ожидающей завершения обработки.
- PR соответствует интенсивности производственного потока.

¹⁾ См. глоссарий на с. 74. Информацию по теории ограничений см. на с. 25.

²⁾ В адаптированном виде приведен материал из книги «Factory Physics», Нопп и Spearman, 2000 г., 2-е издание.

3 Ряд подходов, направленных как на сокращение вариаций, так и на управление ими



Тенденции в производстве

Анализ производственной среды

Важно представлять себе особенности каждой производственной среды. Степень вариаций и характер взаимодействия между процессами

различны в условиях разных производств. Рассмотрим сначала упорядоченную структуру процессов (рис. 4):

Производства, попадающие в верхний левый угол схемы, характеризуются гораздо более высоким

уровнем вариаций, чем расположенные в нижней правой части. Из схемы также видно, что «новые» изделия, первоначально изготавливаемые малыми партиями, обычно попадают в верхнюю левую часть. После успешного запуска производства и устранения начальных систематических производственных дефектов эти изделия могут переместиться в нижний правый угол.

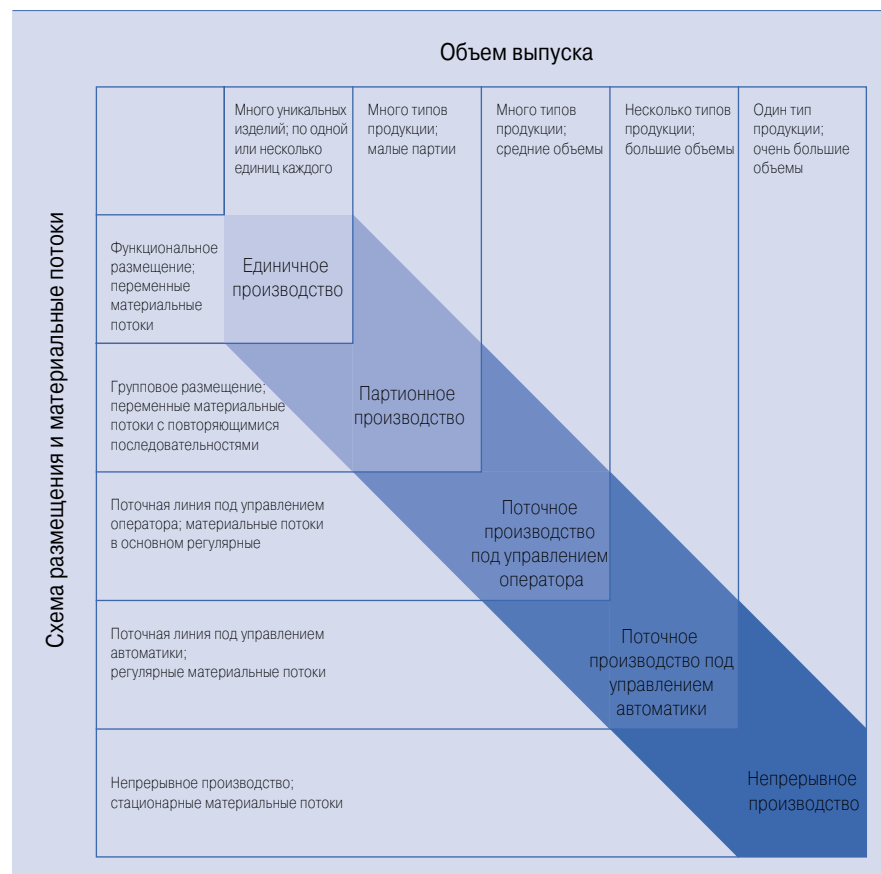
Таблица 1 Набор законов физики предприятия и фундаментальных соотношений

<p>Закон (разнообразия): Повышение разнообразия продукции всегда приводит к снижению показателей производственной системы.</p> <p>Следствие (о месте внесения разнообразия): В случае производственной линии, где выдача нарядов на изготовление осуществляется независимо от завершения обработки, внесение разнообразия на ранних этапах маршрута приводит к большему увеличению времени цикла, чем внесение эквивалентного разнообразия на более позднем этапе.</p> <p>Закон (амортизации разнообразия): Разнообразие в производственной системе компенсируется определенной комбинацией товарных запасов, производственных мощностей и времени.</p> <p>Следствие (о гибкости амортизации): Гибкость системы сокращает требуемую степень амортизации разнообразия в системе.</p>	<p>Закон (производственной мощности): В установившемся режиме любое предприятие выпускает продукцию со средней интенсивностью, меньшей, чем средняя производственная мощность.</p> <p>Закон (использования ресурсов): Если на участке повышается загрузка при прочих равных условиях, средний объем незавершенной продукции (WIP) и время производственного цикла растут сильно нелинейным образом.</p> <p>Закон (сборочных операций): Показатели сборочного участка ухудшаются при увеличении любого из следующих параметров:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ числа компонентов, используемых при сборке, ■ нерегулярности поступления компонентов, ■ рассогласования между поступлениями компонентов.
---	--

Приведенная схема представляет лишь одну точку зрения. Существует и ряд других взглядов. Однако основной вывод, который следует сделать, таков: каждая производственная среда уникальна. Поэтому первый этап должен заключаться в анализе фундаментальных законов конкретного процесса производства, а в особенности совместного функционирования отдельных частей системы, при этом следует уделить внимание характеру наблюдаемых вариаций. Интуитивные действия, осуществляемые без такого анализа, могут привести даже к ухудшению показателей системы.

Если для решения проблемы вариаций выбраны подходящие инструменты, можно добиться значительного повышения показателей производственного процесса. При внедрении концепции CP3 достижение превосходных результатов возможно за шесть месяцев. Освоение фундаментальных законов физики предприятия и расширение этого подхода с охватом взаимодействий между предприятиями позволит достичь еще более высоких результатов. Но это – уже отдельная история.

4 Матрица процессов производства изделий (источник: J. Miltenburg, 1995: «Как сформулировать и реализовать план, ведущий к победе»)



Фредрик Нордстрём

ABB Oy, ABB Corporate Research
Вааса, Финляндия
fredrik.nordstrom@fi.abb.com

Пиотр Гавад

ABB Sp. z o. o.
ABB Corporate Research
Краков, Польша
piotr.gawad@pl.abb.com

Адам Новарски

ABB (China) Limited
ABB Corporate Research
Пекин, КНР
adam.nowarski@cn.abb.com